

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Gregor Juretić**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Dr. sc. Dragan Žeželj

Student:

Gregor Juretić

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Draganu Žeželju na razumijevanju i savjetima tijekom pisanja rada, ali i tijekom studija. Hvala inženjerima Hrvoju Franjiću na strpljenju i informacijama potrebnim za projektiranje uređaja i inženjeru Domagoju Lieblu na njegovim spoznajama i iskustvu o konstruktorskom poslu koje je spremno podijelio sa mnom. Hvala i svim profesorima, asistentima, kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli savjetom ili podrškom tijekom studija.

Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima na velikoj podršci i strpljenju tokom čitavog školovanja, a posebno tijekom fakultetskog obrazovanja.

Gregor Juretić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Gregor Juretić** Mat. br.: 0035143042

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Višenamjenski uređaj za nerazorno ispitivanje cijevi s vanjske strane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Multi-purpose device for NDT pipe scanning from outside**

### Opis zadatka:

Za potrebe nadzora i utvrđivanja stanja cijevi i zavarenih spojeva na cjevovodima razvijeni su razni ručni, poluautomatski i automatski sustavi. Posebnosti pojedinih sustava proizlaze iz oblika dijelova koji su predmet nadzora: mogućnosti pristupa pojedinim mjestima, broju i dimenzijama priključaka, postojanja izolacije ili vanjskog plašta itd. Uporabom ručnih sustava jednostavnije je snimati složenije situacije, ali uvijek postoji mogućnost pogreške operatera te nastanka netočnih rezultata mjerenja. Također, u pojedinim je situacijama nepoželjan dulji boravak operatera na lokaciji snimanja. Poluautomatski i automatski sustavi djelomično dokidaju te greške, ali su istovremeno zahtjevniji obzirom na postupak pripreme, upravljanja i mogućnosti pristupa.

Potrebno je analizirati postojeća rješenja uređaja slične namjene te osmisliti i koncipirati novi uređaj i to na način da budu ispunjeni sljedeći zahtjevi:

- mora biti jednostavan za montažu, podesan za gibanje po cjevovodu s vanjske strane,
- prilagodljiv za nazivne promjere cjevovoda NO200 do NO300 mm,
- mora imati vlastiti pogon, daljinski upravljani žicom,
- snimanje mora biti moguće ostvariti neistovremeno u aksijalnom i cirkularnom smjeru,
- u aksijalnom smjeru brzina snimanja bi trebala biti najmanje 100 mm/s,
- brzina snimanja u cirkularnom smjeru trebala bi biti najmanje 50 mm/s,
- dopuštena greška pozicioniranja je 2,5 mm,
- mora biti u mogućnosti savladavati površinske nepravilnosti do visine od 10 mm po obodu,
- dimenzije uređaja trebaju biti što je moguće manje,
- mora imati priključke potrebne za ugradnju ispitnog uređaja kao i sve ostale potrebne priključke

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih sustava, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom.

Kompletno konstrukcijsko rješenje razraditi na razini sklopova, a odabranih dijelova na razini radioničke dokumentacije.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
8. ožujka 2012.	10. svibnja 2012.	16., 17. i 18. svibnja 2012.

Zadatak zadao:  
Doc. dr. sc. Dragan Žeželj

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Mladen Andrašy

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ISTRAŽIVANJE TRŽIŠTA.....	9
3. LISTA ZAHTJEVA I ŽELJA .....	16
4. RAZMATRANJE MOGUĆIH RJEŠENJA .....	17
5. TOČNOST POZICIONIRANJA .....	30
6. ALGORITAM KORIŠTENJA UREĐAJA.....	35
7. FUNKCIJSKA STRUKTURA .....	36
8. MORFOLOŠKA MATRICA .....	37
9. KONCEPTI .....	38
10. ODABIR KONCEPTA .....	42
11. RAZRADA.....	44
12. MODEL U 3D CAD/CAM SUSTAVU .....	58
13. ZAKLJUČAK.....	64

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Pokrivenost volumena materijala za različite metode ultrazvučnog snimanja .....	2
Slika 2.	Snimanje sondom pod kutem.....	3
Slika 3.	TOFD metoda snimanja.....	4
Slika 4.	Prikaz serije sonde s individualnom dobavom signala .....	5
Slika 5.	Način skretanja i fokusiranja signala.....	5
Slika 6.	Ispitivanje vrtložnim strujama .....	6
Slika 7.	Primjer rezultata ispitivanja stanja korozije .....	7
Slika 8.	AIS Roboscanner .....	9
Slika 9.	AIS Smartscanner .....	10
Slika 10.	Manipulator Beltman.....	11
Slika 11.	SAGE uređaj montiran pored suženja cijevi.....	11
Slika 12.	SAGE uređaj .....	12
Slika 13.	Automatizirani uređaj za snimanje feritnih koljena cijevi.....	13
Slika 14.	SPH Skener bokocrt .....	14
Slika 15.	SPH Skener kosi pogled .....	14
Slika 16.	Crna kutija .....	17
Slika 17.	Dobava gibanja AA .....	19
Slika 18.	Mecanum kotači na viličaru.....	20
Slika 19.	Koncept AA1 .....	20
Slika 20.	Koncept AA2 .....	22
Slika 21.	Koncept AA3 .....	23
Slika 22.	Dobava gibanja AB .....	24
Slika 23.	Koncept AB1 .....	25
Slika 24.	Koncept AB2 .....	26
Slika 25.	Koncept AB3 .....	27
Slika 26.	Dobava gibanja BA .....	28
Slika 27.	Koncept BA1 .....	29
Slika 28.	Skeniranje sa ravnog dijela cijevi .....	30
Slika 29.	Skeniranje sondom u ravnini kotača .....	31
Slika 30.	Skeniranje bočno postavljenom sondom .....	31
Slika 31.	Skeniranje sondom centralno smještenom između kotača .....	32
Slika 32.	Funkcijska struktura .....	36
Slika 33.	Koncept 1 .....	38
Slika 34.	Koncept 2.....	39
Slika 35.	Koncept 3.....	40
Slika 36.	Koncept 4.....	40
Slika 37.	Koncept 5.....	41
Slika 38.	Test magnetskog kotača.....	45
Slika 39.	Zahtjevi geometrije na opruge sklopa kotača .....	48
Slika 40.	Karakteristike odabranih opruga .....	49
Slika 41.	Mreža prve simulacije i prikaz rubnih uvjeta .....	50
Slika 42.	Naprezanje u čvorovima početne mreže.....	51
Slika 43.	Mreža konačne simulacije okvira NO300 .....	51
Slika 44.	Najveće opterećenje okvira.....	52
Slika 45.	Deformacije okvira uvećane 200 puta.....	52

Slika 46	Konvergenција naprežanja .....	53
Slika 47	Konvergenција pomaka .....	53
Slika 48	Naprežanja okvira za ispitivanje cijevi NO1000 pri opterećenju od 400N .....	54
Slika 49	Pomaci okvira za ispitivanje cijevi NO1000 uvećani pedeset puta .....	54
Slika 50	Odabir senzora .....	55
Slika 51	Karakteristika step motora AM2224 .....	57
Slika 52	Snimanje koljena NO300 .....	58
Slika 53	Okviri NO300 do NO1000 .....	59
Slika 54	Udaljenost vozila sonde na najmanjem radijusu koljena NO300 .....	60
Slika 55	Udaljenost motora od okvira uređaja pri snimanju cijevi NO300 .....	60
Slika 56	Najmanja udaljenost senzora od podloge na cijevi NO300 .....	61
Slika 57	Najmanja udaljenost senzora od podloge na cijevi NO200 .....	61
Slika 58	Tlocrt kotača .....	62
Slika 59	Kopča i spajanje magnetične trake .....	62
Slika 60	Ispitivanje koljena NO200 .....	63
Slika 61	Ispitivanje koljena NO300 .....	63

**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Mogućnosti SAGE uređaja .....	12
Tablica 2	Lista zahtjeva i želja .....	16
Tablica 4.	Gruba morfološka matrica .....	18
Tablica 3.	Podjela prema dobavi gibanja .....	19
Tablica 5.	Morfološka matrica .....	37
Tablica 6.	Konvergencya rezultata simulacije konačnim elementima .....	53



**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

00-00      Uređaj za ispitivanje cijevi Thomas

10-00      Podsklop okvir

10-01      Nosač kotača

10-02      Plašt muški

10-03      Plašt ženski

10-04      Ukruta lijeva

10-05      Ukruta desna

10-06      Podložna ploča

10-07      Traka vozila sonde

10-08      Ploča panta

10-09      Zatik panta

10-10      Poluga kopče

10-11      Uporište kopče

10-12      Karika kopče

10-13      Prihvat karike

10-14      Kopča tračnica

10-15      Zatik kopče tračnica

20-00      Sklop kotača

20-01      Montažna ploča

20-02      Uporište opruge

20-03      Montažna ploča kotača

20-04      Nosač senzora

20-05      Nosač motora

20-06      Zatik kotača

21-00      Uporište opruge

21-01      Ploča uporišta opruge

22-00      Kotač

22-01      Glavčina

22-02      Guma

30-00      Sklop mjerača udaljenosti



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_{trenja, staticki}$	N	potrebna sila trenja za zadržavanje uređaja na okomitoj cijevi
$F_{ubrzanja}$	N	sila potrebna za ubrzanje uređaja
$F_{prilikotvert}$	N	ukupna potrebna sila za gibanje manipulatora po okomitoj cijevi za okvir NO300
$F_{horiz\ max\ NO300}$	N	najveća proračunska sila na kotaču za okvir NO300
$F_{horiz\ min\ NO300}$	N	najmanja proračunska sila na kotaču za okvir NO300
$F_{prilikotvertNO1000}$	N	ukupna potrebna sila za gibanje manipulatora po okomitoj cijevi za okvir NO1000
$F_{horiz\ max\ NO1000}$	N	najveća proračunska sila na kotaču za okvir NO1000
$F_{horiz\ min\ NO1000}$	N	najmanja proračunska sila na kotaču za okvir NO1000
$\alpha$	°	najveća greška u okomitosti uređaja na cijev
$\Delta y$	mm	aksijalna greška u jednom smjeru
$\Delta y_{max}$	mm	ukupna greška aksijalnog pozicioniranja
$\omega_{kotača}$	1/s	kutna brzina kotača
$i_{proračunski}$		proračunski prijenosni omjer reduktora
$i_{odabrani}$		odabrani prijenosni omjer
$M_{kotača}$	Nm	najveći moment na kotaču
$S_{sklopapogona}$		sigurnost od preskakanja step motora

## SAŽETAK

U ovom radu je prikazana sinteza višenamjenskog uređaja za ispitivanje austenitnih cijevi promjera NO200 do NO300, sposobnog prelaziti preko koljena cijevi i pritom ih ispitati. Zahtjev za uređajem dolazi iz tvrtke INETEC koja je zainteresirana za ispitivanje što je moguće većeg raspona cijevi pa je stoga pri sintezi uzet u obzir i raspon cijevi sve do NO1000. Za sintezu uređaja bilo je potrebno istražiti slične uređaje na tržištu, proširiti znanje o nuklearnim elektranama i problemima pri njihovom održavanju, o nerazornim ispitivanjima, o višesmjernim i magnetskom kotačima te o step motorima. Predloženo je modularno rješenje koje je u stanju vršiti ispitivanja u zadanoj točnosti i prelaziti preko koljena cijevi u rasponu od NO200 do NO1000.

U prvom dijelu opisan je proces razrade uređaja za koji nema adekvatnih postojećih rješenja, već se uzima u obzir što je veći moguć broj mogućih rješenja i bira smjer daljnje razrade.

U drugom dijelu izvršeni su kritični proračuni i pokusi koji pokazuju da će prototip, ukoliko se izradi, biti funkcionalan i dobra podloga za daljnja poboljšanja i testiranje potrebnog softvera.

## **1. UVOD**

Nerazorna ispitivanja su neinvazivne metode otkrivanja grešaka u materijalu. U kontekstu ovog rada termin se odnosi na ispitivanje pukotina nastalih pri hlađenju cijevi nakon zavarivanja, ostalih grešaka u materijalu nastalih prilikom izrade ili eksploatacije te na snimanje korozije. Nerazorna ispitivanja imaju posebnu važnost jer pomoću njih možemo uočiti grešku u materijalu tokom radnog vijeka zahtjevnih djelova prije nego dođe do gubitka funkcije ili težih posljedica. Najčešće korištene nerazorne metode ispitivanja su ultrazvučno snimanje, ispitivanje vrtložnim strujama te vizualno lociranje pukotina pomoću penetranata. Fokus ovog diplomskog rada je na razvoju manipulatora koji će služiti za dobavu gibanja proizvoljno odabranom nosaču sonde za snimanje cijevi s vanjske strane za što je moguće više situacija poput snimanja koljena cijevi, sučeonih zavora cijevi, spojeva cijevi s posudama te spojeva na proširenja i suženja cijevi. Manipulator mora biti u mogućnosti ispitivati nemagnetične cijevi, a posebni zahtjevi proizlaze iz razloga da se ispitivanja vrše na područjima s povećanom opasnošću od nuklearne radijacije pa je poželjno omogućiti što kraću prisutnost operatera na samoj lokaciji snimanja.

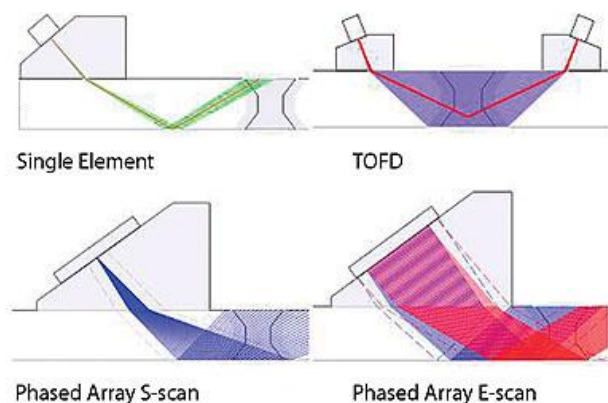
## 1.1. Uloga nerazornih ispitivanja u održavanju nuklearnih elektrana

Razlikujemo dvije glavne vrste održavanja: prediktivnu i korektivnu. Okidač korektivnog održavanja je kvar uređaja, a održavanje podrazumijeva pronalazak kvara i zamjenu dijela. Prediktivno održavanje podrazumijeva periodičke kontrole kritičnih dijelova i ocjenu stanja sustava ili kontinuirano praćenje sustava. Kada ispitivanje strojnog dijela pokaže kritičnu količinu defekata uslijed zamora materijala ili trošenja slijedi preventivna zamjena. U slučaju nerazornih ispitivanja nuklearnih elektrana koristi se periodičko prediktivno održavanje. Primjerice, za N.E. Krško ispitivanja se provode svakih 18 mjeseci.

U sljedećim poglavljima iznesene su najčešće korištene metode nerazornog ispitivanja.

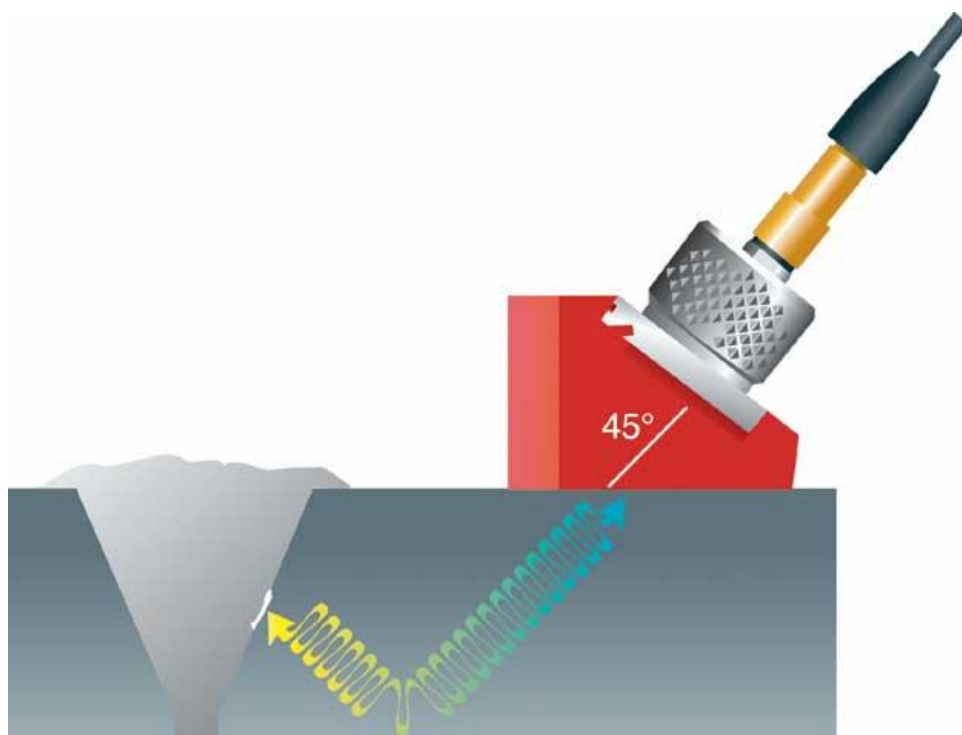
## 1.2. Ultrazvučno ispitivanje zavora

Ispitivanje se vrši odašiljanjem ultrazvučnog signala u materijal i praćenjem odaziva. Za tu namjenu je razvijeno više metoda snimanja kao i više vrsta sondi.



**Slika 1. Pokrivenost volumena materijala za različite metode ultrazvučnog snimanja**

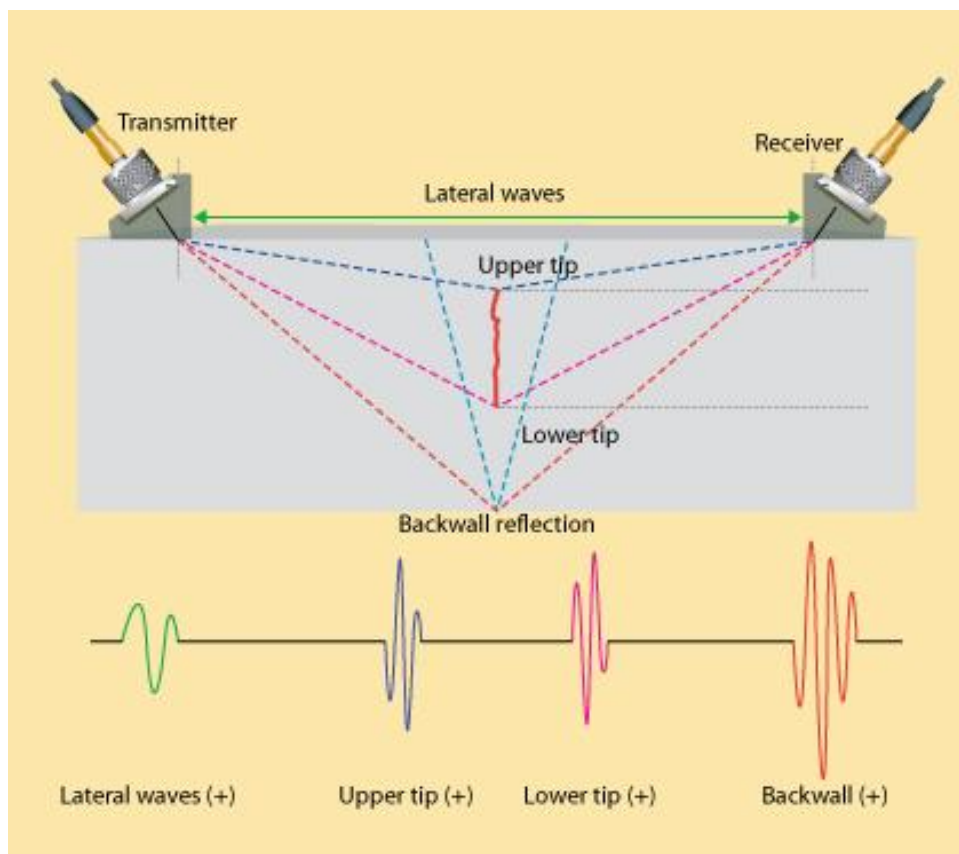
### 1.2.1. Ispitivanje jednom sondom



**Slika 2. Snimanje sondom pod kutem**

Sonde razlikujemo prema veličini i prema kutu signala. Veličina sonde je ponajprije bitna za debljinu materijala koji se snima. Primjerice, male sonde mogu snimati samo tanke stijenke. Kut signala određuje smjer u kojem sonda uočava greške pa tako postoje okomite sonde i sonde pod kutem ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ). Pošto je pokrivenost volumena po jednoj sondi relativno mala poželjno je snimati pomoću više sondi s različitim kutovima signala istovremeno.

### 1.2.2. TOFD metoda



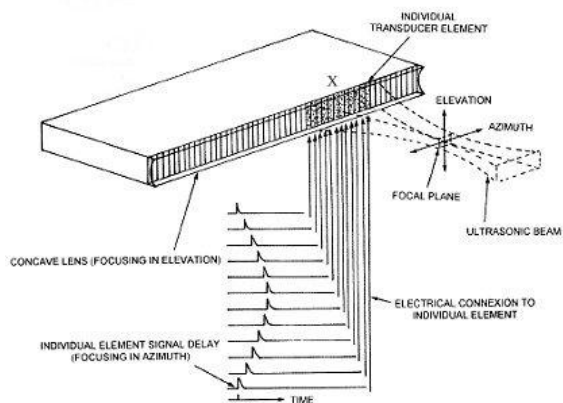
**Slika 3. TOFD metoda snimanja**

Pri TOFD (*Time Of Flight Diffraction*) metodi odašiljač ultrazvučnog signala je s jedne strane zavora, a prijemnik s druge. Pukotine i greške u materijalu se očitavaju pomoću anomalija signala u prijemniku. TOFD metoda pruža potpunu pokrivenost volumena zavora pa je potrebno manje prolaza za pouzdan rezultat.

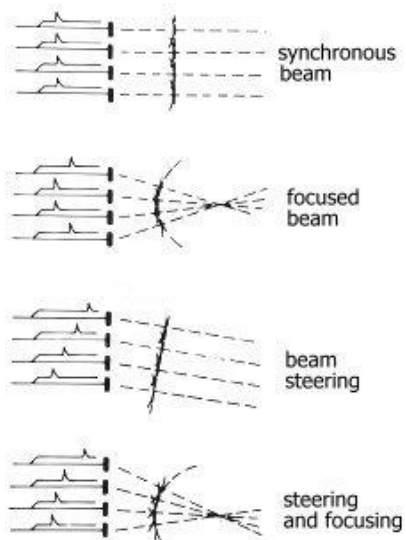


### 1.2.3. *Phased array*

Ovdje riječ *phased* označava mogućnost pomaka faza signala, a *array* red sondi. Pomoću kontroliranog faznog pomaka na svakoj pojedinoj sondi signal je moguće usmjeriti ili fokusirati po potrebi.

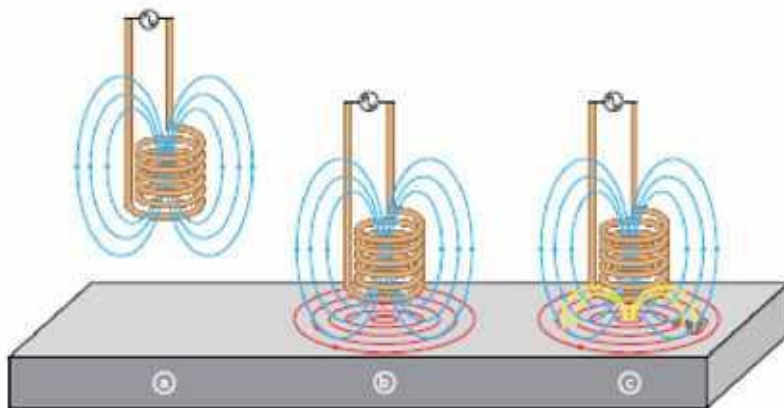


**Slika 4. Prikaz serije sonde s individualnom dobavom signala**



**Slika 5. Način skretanja i fokusiranja signala**

### 1.3. Ispitivanje vrtložnim strujama

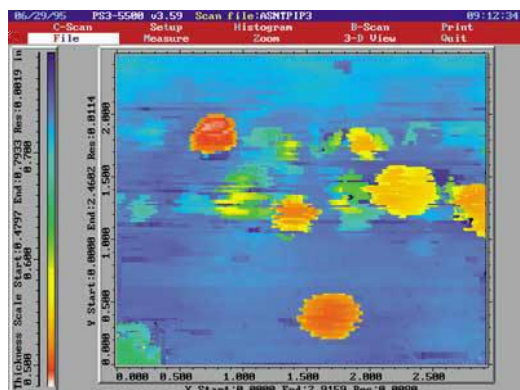


**Slika 6. Ispitivanje vrtložnim strujama**

Izmjenična struja koja teče kroz zavojnicu inducira promjenjivo magnetsko polje Slika 6.

Ispitivanje vrtložnim strujama.(a). Kad se zavojnica približi materijalu u materijalu se inducira vrtložna struja (b) koja pak stvara novo promjenjivo magnetsko polje koje inducira struju u zavojnici. Struja inducirana u zavojnici služi kao signal, ukoliko u materijalu postoji defekt on stvara otpor vrtložnim strujama što stvara anomaliju u signalu.

## 1.4. Ispitivanje stanja korozije



Slika 7. Primjer rezultata ispitivanja stanja korozije

Snimanje stanja korozije se vrši ultrazvučnom izmjerom debljine stijenke dijela i pruža uvid u stanje materijala. Česta primjena je ispitivanje tlačnih posuda, cijevi, nuklearnih reaktora, spremnika za skladištenje i snimanje oplata brodova.

## 1.5. Standardne dimenzije koljena cijevi

Radi pravilnog oblikovanja uređaja nužno je poznavati kakve su normirane dimenzije cijevnih priključaka. Fokus sinteze će biti na uređaju koji može prelaziti preko koljena cijevi, a za to je nužno poznavati najveće i najmanje mjere koje će dodatno ograničavati raspoloživi prostor za sintezu uređaja.

### 1.5.1. DIN 2605

Cijevni lukovi se proizvode u dvije glavne skupine: lukovi s smanjenim stupnjem iskorištenja DIN 2605 T1/91 i lukovi s potpunim stupnjem iskorištenja DIN 2605 T2/91. Uvidom u standard ispostavilo se da kut luka (45, 90, 180) niti skupina ne utječu na vanjske dimenzije koje su jedine bitne za sintezu uređaja.

Prema ovim standardima najmanji radijusi cijevnih lukova NO 200 su 254 mm, uz vanjski promjer 219.1 mm. Za cijevne lukove NO300 iste mjere iznose 305 i 323.9 mm. Utjecaj tolerancije mjere b na geometriju koljena nije lako pretpostaviti jer je namjena mjere pozicioniranje cijevi za zavarivanje i nepoznato je kako utječe na kružnost presjeka ili radijus koljena cijevi.

**1.5.2. ANSI B 16.28-1986**

Prema Američkom standardu mjere oštro zakrivljenih cijevnih lukova nominalnih dimenzija 8" do 10" su ekvivalentne mjerama NO200 do NO300 po vanjskim dimenzijama, jedino imaju nešto manje radijuse koljena pa će iz tog razloga ovaj standard biti mjerodavan za sintezu. Cijevni lukovi 8" imaju radijus koljena 203 mm, a vanjski promjer cijevi je 219 mm, cijevni lukovi 12" su radijusa 305mm i vanjskog promjera cijevi 324 mm.

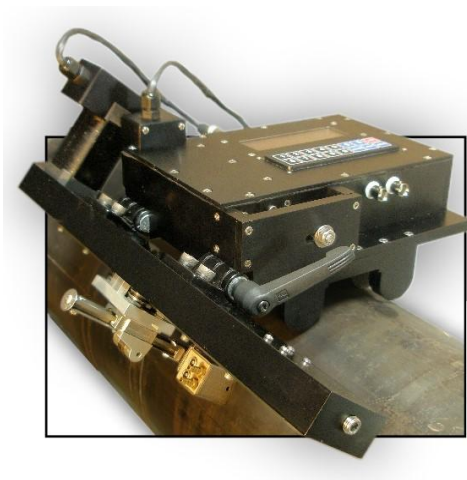
## 2. ISTRAŽIVANJE TRŽIŠTA

Prije pristupanja konstruiranju uređaja uvijek je potrebno istražiti konkurentne proizvode i vidjeti već uhodane načine pristupanja sličnom problemu. Pošto je na tržištu prisutno svega nekoliko uređaja slične namjene bilo je prikladno u razmatranje uključiti i uređaje za ispitivanje magnetskih cijevi.

### 2.1. AIS- Automated Inspection Systems

Automated Inspection Systems je tvrtka smještena u Kaliforniji, SAD, osnovana 1996. godine, specijalizirana za automatizirana ultrazvučna ispitivanja, razvoj primjene istih i terenske usluge. AIS se bavi proizvodnjom sustava i kompletnih rješenja za raznolike potrebe klijenata.

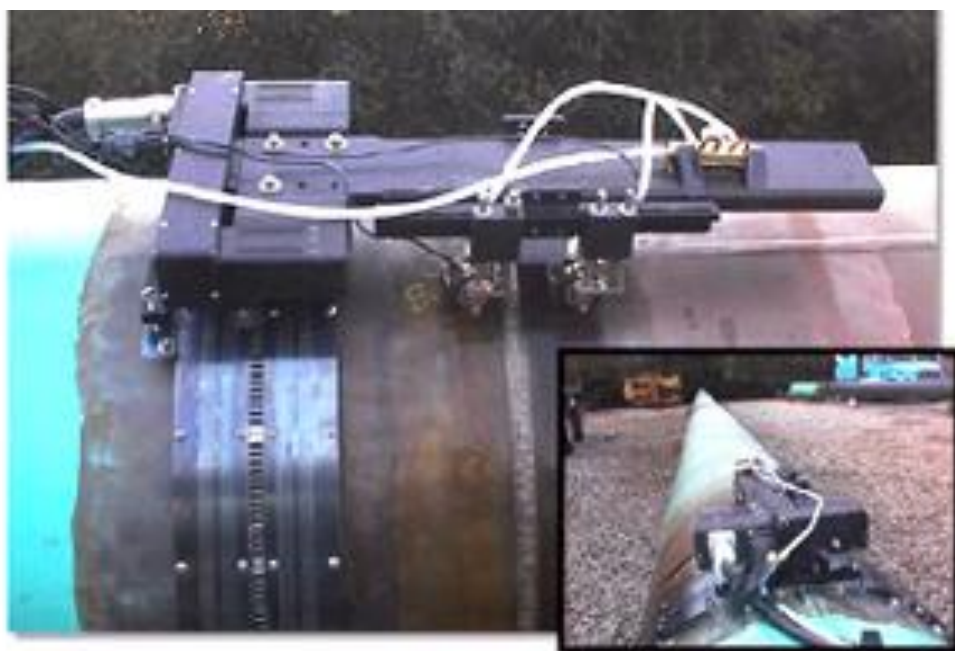
#### 2.1.1. Roboscanner



**Slika 8. AIS Roboscanner**

Automatizirani skener za skeniranje isključivo magnetskih cijevi promjera 50 mm pa sve do ravnih ploha. Uređaj ima integriranu upravljačku jedinicu i korisničko sučelje pa dodatno računalo nije potrebno. Brzina snimanja stanja korozije je 775 cm<sup>2</sup>/min, a kompatibilan je za TOFD i *Phased Array* metode. Napajanje 110/220 V AC ili 12 V DC.

### 2.1.2. *Smartscanner*



**Slika 9.** *AIS Smartscanner*

Za razliku od prethodnog uređaja, *Smartscanner* ima bočno postavljene nosače sondi koji omogućavaju pomake sonde, a time i skeniranje cijevnih priključaka. Bočno postavljene sonde također omogućavaju montažu magnetskog nosača s kojim je uređaj sposoban snimati i nemagnetične cijevi.

## 2.2. **Phoenix Inspection systems**

Tvrtka Phoenix ISL je smještena u Ujedinjenom Kraljevstvu i preko 25 godina se bavi rješavanjem kompleksnih problema nerazornih ispitivanja. Specijalizirana je za automatizirana ultrazvučna ispitivanja, razvoj primjene istih i terenske usluge. Phoenix ISL se bavi proizvodnjom sustava i kompletnih rješenja za raznolike potrebe klijenata.

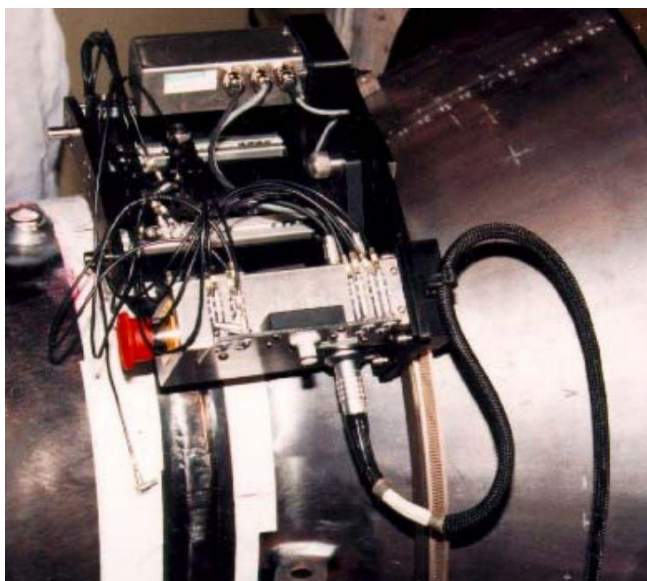
### 2.2.1. Beltman



**Slika 10. Manipulator Beltman**

Ručni dvoosni skener za snimanje cijevi promjera od 100 mm, sve do ravne plohe. Nosač se sastoji od lanca s magnetskim kotačima. Aksijalna širina snimanja je 600 mm, a dodatni magnetski kotači osiguravaju krutost nosive konstrukcije. Zanimljivost ovog uređaja za istraživanje je da je nepovoljno opterećen za puzanje kotača prema dolje uslijed mase uređaja. Čini se da se s tim problemom suočavaju pomoću nosivog lanca s jakim magnetskim kotačima i dodatnim pritezanjem lanca oko cijevi.

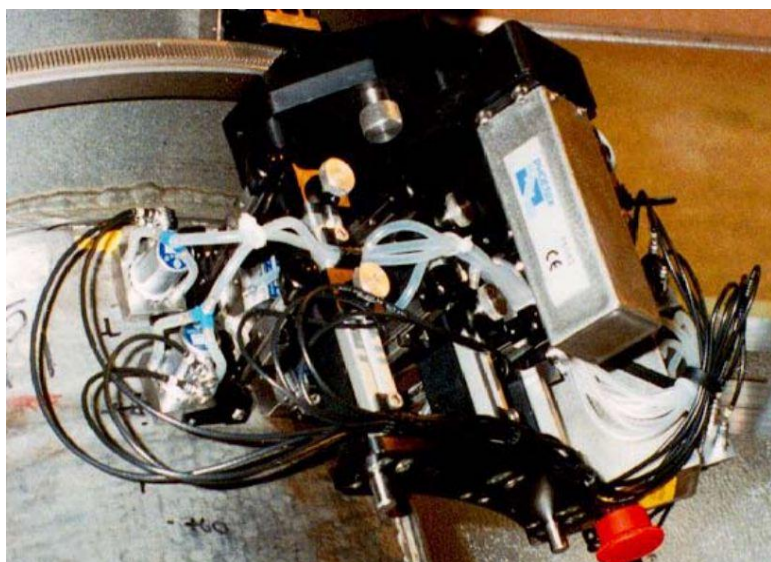
### 2.2.2. SAGE - Two Axis Motorised Pipe Scanner



**Slika 11. SAGE uređaj montiran pored suženja cijevi**



Uređaj je prikladan za ispitivanja u nuklearnim elektranama. U slučaju nestanka električne energije uređaj se zaustavlja radi samokočnosti prijenosa gibanja, a pri povratku električne energije snimanje cijevi se može nastaviti bez dodatne intervencije operatera na mjestu snimanja. Vrijeme sklapanja uređaja od strane dva operatera je 10 minuta. Sklop se sastoji od prstena za montažu, manipulatora, pogona u aksijalnom i radijalnom smjeru, nosača sonde i 12 metarskog kabla za dobavu struje i signala.



**Slika 12. SAGE uređaj**

Uređaj je namijenjen za inspekciju cijevi sljedeće geometrije:

**Tablica 1 Mogućnosti SAGE uređaja**

	MINI SAGE	SAGE	MAXI SAGE
Min. Ø cijevi	105 mm	310 mm	700 mm
Max. Ø cijevi	285 mm	700 mm	Beskonačni
Max. Kut suženja	30°	30°	30°
Min. Radijus suženja	10 mm	10 mm	10 mm
Min. radijus koljena	1.5D	1.5D	1.5D
Radijalna visina uređaja	200 mm	200 mm	200 mm
Aksijalna širina uređaja	500 mm	500 mm	500 mm



Ostale konfiguracije cijevi je moguće skenirati koristeći izmjenjive montažne prstenove i oslonce.

### 2.2.3. *MagBug*



**Slika 13.** Automatizirani uređaj za snimanje feritnih koljena cijevi

Noviji manipulator korišten za ispitivanje cijevi nuklearne elektrane iz Mühleberga u Švicarskoj. Tvrtka BKW FMB Energy Ltd, koja upravlja elektranom je naručila manipulator koji može snimati ravne cijevi, a može i prelaziti preko koljena cijevi. Namijenjen je za ispitivanje feritnih cijevi od NO100 do NO500 mm s radijusom koljena od 1.5D; radijalna visina uređaja 80 mm. Uređaj je baziran na prethodno razvijenom MagBug modulu originalno namijenjenom za skeniranje korijena lopatica na turbinama.

### 2.2.4. *PRIME - Primary circuit*

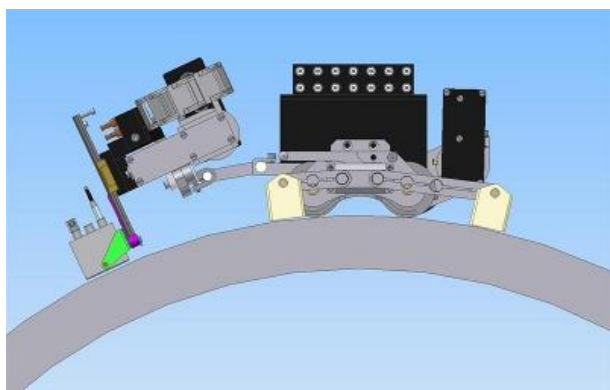


Namijenjen toplom i hladnom ispitivanju cijevi parogenerators uključujući zavarene spojeve cijevi i spojeve cijevi s koljenom. Aksijalna visina manipulatora je 70 mm, u sklop je uključena stanica za napajanje s dobavnim kablom, montaža je moguća na cijev i na koljeno cijevi.

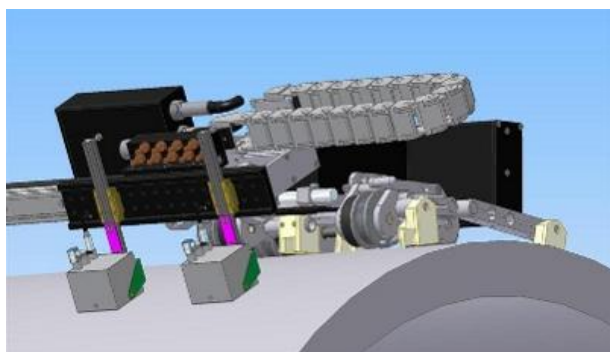
### 2.3. Hrid d.o.o.

Tvrtka HRID d.o.o. za razvoj i primjenu tehnologija osnovana je 2002. godine u Zagrebu. Između ostalog, bave se provedbom nerazornih ispitivanja opreme i postrojenja, razvojem i primjenom novih tehnologija, analizom čvrstoće i stabilnosti konstrukcija te ocjenjivanjem stanja preostalog radnog vijeka strojarske opreme.

#### 2.3.1. HRID SPH scanner



Slika 14. SPH Skener bokocrt



Slika 15. SPH Skener kosi pogled

SPH Skener je namijenjen za feritne cijevi i ima ograničen raspon skeniranja u aksijalnom smjeru. Tehnički podatci nisu dostupni.

---

## 2.4. Zaključak istraživanja tržišta

Istraživanje konkurentnih proizvoda je pokazalo da su srodni uređaji u najvećoj mjeri namijenjeni za korištenje uz pomoć operatera, a automatizirane varijante su u najvećoj mjeri namijenjene skeniranju feritnih cijevi. *Phoenix inspection systems* manipulatori SAGE i PRIME su najbliži zadatku diplomskog rada. Uočen je nedostatak na tržištu, skeneri koljena nemagnetičnih cijevi nisu pronađeni, a samo je jedan manipulator u stanju prelaziti preko koljena cijevi. Radi se o uređaju *MagBug* koji tvrtka BKV FMB Energy Ltd koristi pri ispitivanju cjevovoda nuklearne elektrane u Mühlebergu u Švicarskoj. Njegova sposobnost ispitivanja cijevi radijusa 4" do 20" (100 do 500 mm) i prelaska preko koljena se dosad pokazala korisnom jer nadomješta veći broj uređaja. Prema ispitivanju tržišta razvoj višenamjenskog manipulatora koji se može kretati preko nemagnetičnih koljena i pritom ih ispitati potpuno je opravdan.

### 3. LISTA ZAHTJEVA I ŽELJA

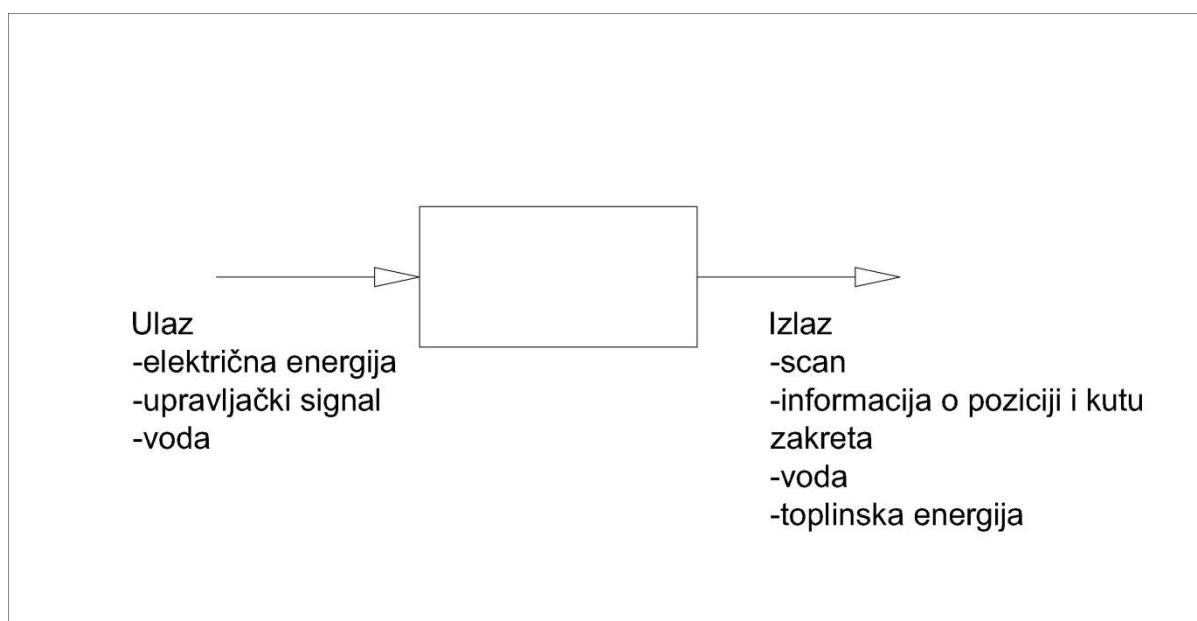
Tablica 2 Lista zahtjeva i želja

	Zahtjev	Želja
Min. Ø cijevi	NO200	NO100
Max. Ø cijevi	NO300	NO1000
Radikalna visina uređaja	100 mm	50 mm
Aksijalna širina uređaja		100 mm
Točnost pozicioniranja	2.5 mm	<1 mm
Vrijeme montaže	15 min	1 min
Max. masa uređaja	10 kg	5 kg
Aksijalna širina snimanja	500 mm	>1000 mm
Min. radijus koljena		1D
Aksijalna širina uređaja		500 mm
Nehrđajući materijali	Z	
Ispitivanje zavora cijev-cijev	Z	
Ispitivanje zavora cijev-koljeno	Z	
Ispitivanje zavora cijev-redukcija		Ž
Ispitivanje zavora cijev-posuda		Ž
Ispitivanje koljena cijevi		Ž
Rad bez prisutnosti operatera		Ž

## 4. RAZMATRANJE MOGUĆIH RJEŠENJA

Pošto se pristupa problemu bez zadovoljavajućih postojećih rješenja postoji potreba za postavljanjem okvira za konkretnije promišljanje o mogućim konceptima. To je ovdje učinjeno razmatranjem mogućnosti dobave gibanja i stvaranjem grubih idejnih skica koncepata koji su poslužili kao početne smjernice u daljnjoj sintezi uređaja.

### 4.1. Crna kutija



Slika 16. Crna kutija

**4.2. Gruba morfološka matrica****Tablica 3. Gruba morfološka matrica**

	1	2	3	4
Kućište	Kruti rasklopivi okvir	Modularni lanac s napinjačem	Podesiva vilica	Modularni podesivi okvir
Prihvat kućišta za cijev	Kotačima	Lancem	Remenom	Čičak trakom
Pogon kućišta	Obični kotači	Holonomni kotači	Mecanum kotači	Gusjenica
Prihvat pogona kućišta	Kruti	Elastični	Prednapinjanje pa otpuštanje nakon montaže	
Prihvat sonde	Kruto vezana na kućište	Vezana na obodno vozilo sonde		
Očitavanje položaja	Mjerni kotačić	Indukcijski mjerač udaljenosti	Trakom	Vizualni sustav
Očitavanje kuta zakreta	Akcelerometar	Inklinometar	Vizualni sustav	Fiksnim prijenosnim omjerom

### 4.3. Podjela prema dobavi gibanja

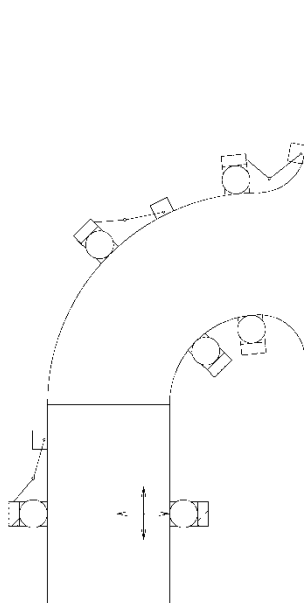
Tablica 4. Podjela prema dobavi gibanja

	A	B
Dobava linearnog gibanja	Kućištem	sondom
Dobava rotacijskog gibanja	Kućištem	sondom

Pomoću ovakve podjele možemo uočiti tri porodice manipulatora prema načinu dobave gibanja; AA, AB i BA. Porodica BB nije primjenjiva za zadanu problematiku.

### 4.4. Početni koncepti

#### 4.4.1. Dobava gibanja AA



Slika 17 Dobava gibanja AA

Kod ovakve dobave gibanja oba smjera dobavlja kućište. To je moguće jednostavno izvesti pomoću holonomnih ili mecanum kotača. To su kotači s obodno uležištenim valjcima koji preuzimaju funkciju kotrljanja po podlozi. Kod mecanum kotača kut osi uležištenja valjaka i kotača iznosi  $45^\circ$  dok kod holonomnih  $90^\circ$ .



**Slika 18, Mekanum kotači na viličaru**

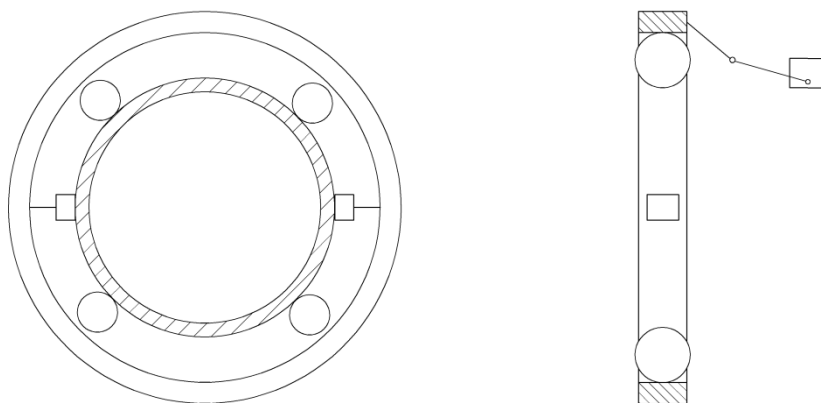
Prednosti:

- jednostavnost izvedbe
- moguć prijelaz preko koljena kao i skeniranje spoja s posudom
- moguće snimanje cijele slobodne dužine cijevi između nosača iz sigurne udaljenosti pa tako i svih zavora na toj relaciji
- moguć stalni okomit kontakt sonde montirane u ravnini kotača
- uz adekvatno programiranje moguće su fine korekcije položaja tokom snimanja

Mane:

- komplikacija preciznog mjerenja prijedene udaljenosti
- Na okomitim cijevima komplikacija mjerenja kuta zakreta

#### 4.4.1.1. Koncept AA1



**Slika 19 Koncept AA1**

- lagani okvir modularno dizajniran za različite promjere cijevi



- pogon na 4 kotača s promjenjivim smjerom kretanja
- centralno smještene sonde
- po potrebi moguća montaža obodne sonde za snimanje spojeva cijev-posuda
- svi djelovi se jednostavno montiraju u okvire različitih promjera i omogućen im je radijalni hod

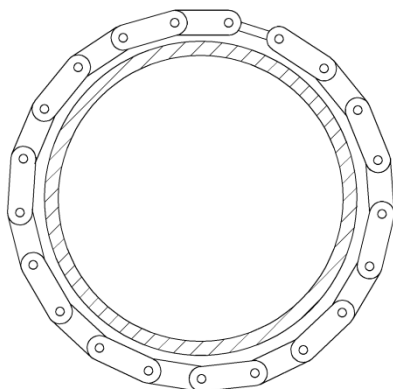
Prednosti:

- krutost okvira
- brza montaža
- moguć prijelaz preko koljena kao i skeniranje spoja cijev-posuda
- moguće snimanje cijele slobodne dužine cijevi između nosača iz sigurne udaljenosti
- jednostavno je omogućiti stalni okomit kontakt sonde montirane u ravnini kotača
- uz adekvatne senzore moguće su fine korekcije položaja tokom scana

Mane:

- nezgrapni okviri i upitna krutost okvira na velikim promjerima
- vjerojatna potreba za vanjskim modulom za očitavanje pozicije ili korištenja graničnika
- komplikacija očitavanja pozicije
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisлити pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe

#### 4.4.1.2. Koncept AA2



**Slika 20 Koncept AA2**

Modularni lanac; moduli su:

- sonda
- pogon s mehanum kotačićima
- oslonac s holonomnim kotačićima
- bočna sonda za snimanje spoja cijev-posuda

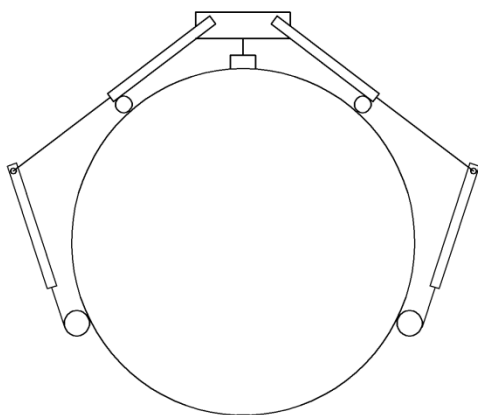
Prednosti:

- prikladan za veliki raspon promjera cijevi
- brza montaža
- moguć prijelaz preko koljena kao i skeniranje spoja cijev-posuda
- moguće snimanje cijele slobodne dužine cijevi između nosača iz sigurne udaljenosti
- jednostavno je omogućiti stalni okomit kontakt sonde montirane u ravnini kotača
- uz adekvatne senzore moguće su fine korekcije položaja tokom scana

Mane:

- vjerojatna potreba za vanjskim modulom za očitavanje pozicije ili korištenja graničnika
- komplikacija očitavanja pozicije
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisliti pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe

#### 4.4.1.3. Koncept AA3



**Slika 21 Koncept AA3**

- kućište podesiva čeljust
- pogon zakretnim kotačima

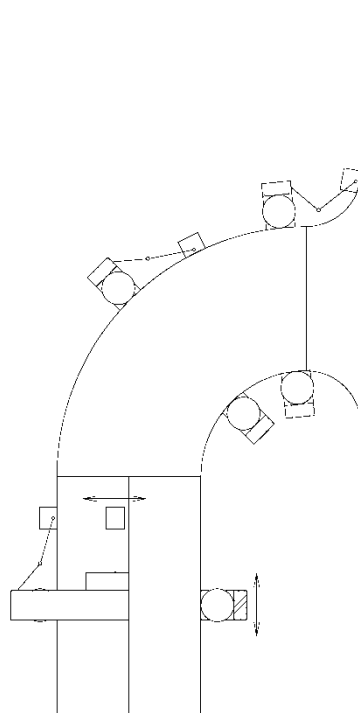
Prednosti:

- najjednostavnija montaža
- moguć prijelaz preko koljena kao i skeniranje spoja cijev-posuda
- moguće snimanje cijele slobodne dužine cijevi između nosača iz sigurne udaljenosti
- jednostavno je omogućiti stalni okomit kontakt sonde montirane u ravnini kotača
- uz adekvatne senzore moguće su fine korekcije položaja tokom scana

Mane:

- nezgrapni okviri i upitna krutost okvira na velikim promjerima
- vjerojatna potreba za vanjskim modulom za očitavanje pozicije ili korištenja graničnika
- komplikacija očitavanja pozicije
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisliti pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe

#### 4.4.2. Dobava gibanja AB



**Slika 22 Dobava gibanja AB**

Pri ovakvoj dobavi gibanja kućište vrši linearno gibanje, a sonda obodno.

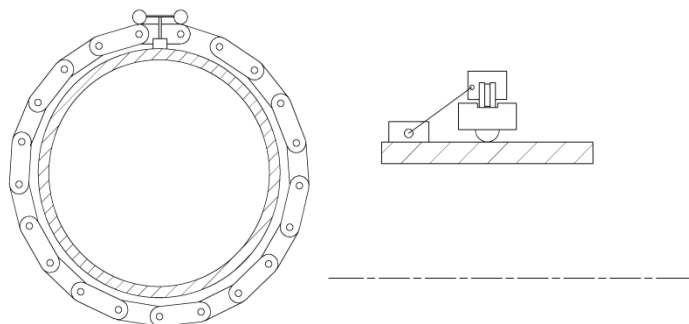
Prednosti:

- jednostavno i precizno očitavanje pozicije
- moguć prijelaz preko koljena kao i skeniranje spoja sa posudom
- moguće snimanje cijele slobodne dužine cijevi između nosača iz sigurne udaljenosti pa tako i svih zavora na toj relaciji

Mane:

- nemoguće postavljanje sonde u optimalni položaj pri ispitivanju koljena
- veća širina manipulatora

#### 4.4.2.1. Koncept AB1



**Slika 23 Koncept AB1**

Modularni lanac s putujućom sondom; moduli su:

- pogonski modul s običnim kotačima
- vezni modul

Pogonski lanac je omotan čeličnom trakom kojom magnetskim kotačima putuje sonda.

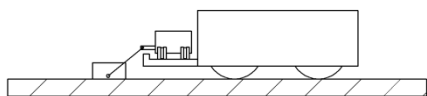
Prednosti:

- jednostavno i precizno očitavanje pozicije u oba smjera
- moguć prijelaz preko koljena kao i skeniranje spoja cijev-posuda
- moguće snimanje cijele slobodne dužine cijevi između nosača iz sigurne udaljenosti
- jednostavno je omogućiti stalni okomit kontakt sonde montirane u ravnini kotača

Mane:

- na malim promjerima problem nejednolikog radijusa trake
- na malim promjerima cijevi širina lanca je problematična za prijelaz preko koljena
- problem stabilnosti jednog kotača na velikim promjerima, tada su nužna dva
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisliti pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe
- nužno osmisliti montažu trake
- duža montaža

#### 4.4.2.2. Koncept AB2



**Slika 24 Koncept AB2**

Modularni lanac s putujućom sondom; moduli su:

- pogonski modul s običnim kotačima
- vezni modul

Pogonski lanac konzolno nosi šinu s čeličnom trakom.

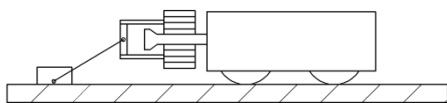
Prednosti:

- niski profil
- jednostavno i precizno očitavanje pozicije u oba smjera
- slobodno kretanje po ravnim cijevima i preko koljena većih cijevi

Mane:

- širina uređaja
- nemoguć prijelaz preko manjih koljena
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisliti pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe
- nužno osmisliti montažu trake
- udar kotača sonde u brid trake

#### 4.4.2.3. Koncept AB3



**Slika 25 Koncept AB3**

Modularni lanac s putujućom sondom; moduli su:

- pogonski modul s običnim kotačima
- vezni modul
- pogonski lanac konzolno nosi šinu za gusjeničara sonde
- elastična šina od tvrde gume

Prednosti:

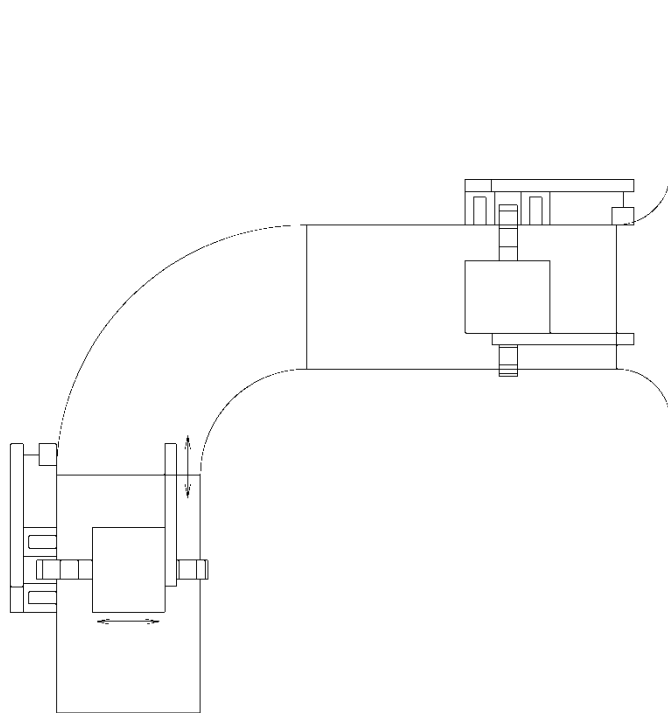
- niski profil
- jednostavno i precizno očitavanje pozicije u oba smjera
- slobodno kretanje po ravnim cijevima i preko koljena većih cijevi
- gusjeničar ne reagira na određeni razmak susjednih šina pa je sonda mekše vođena

Mane:

- nemoguć prijelaz preko manjih koljena
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisliti pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe
- nužno osmisliti vođenje gusjeničara po nosačima

#### 4.4.3. Dobava gibanja BA

Iz istraživanja tržišta je očito da je većina manipulatora iz ove porodice i to su najčešće manipulatori s magnetskim kotačima. Daljnji razvoj ovih koncepata bi se bazirao na razvoju prihvatnog sustava manipulatora s magnetskim kotačima u svrhu ispitivanja austenitnih cijevi.



**Slika 26 Dobava gibanja BA**

Prednosti:

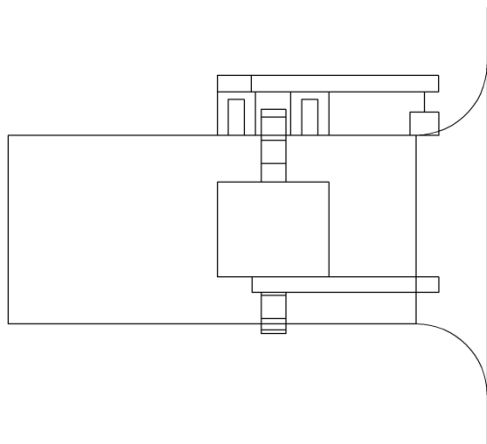
- kompaktnost
- veliki raspon radijusa cijevi i mogućnost ispitivanja ravnih ploha

Mane:

- nemoguće postavljanje sonde u optimalni položaj pri ispitivanju koljena
- ograničeno kretanje sonde; ispitivanje jednog zavara po montaži manipulatora na cijev, za idući zavar potrebno je pomaknuti uređaj



#### 4.4.3.1. Koncept BA1



**Slika 27 Koncept BA1**

- Prihvat postojećeg manipulatora remenom, lancem ili čičak trakom za nemagnetične cijevi
- Manipulator nakon montaže napne remen i ostvari silu pritiska kotača na cijev

Prednosti:

- najbrži razvoj za skeniranje koljena i spojeva cijev-posuda
- brza montaža

Mane:

- skeniranje jednog zavora po montaži
- bočna sonda je u ekscentru pa je nužno osmisлити pozicioniranje za dvostruko zakrivljene plohe

#### 4.5. Zaključak

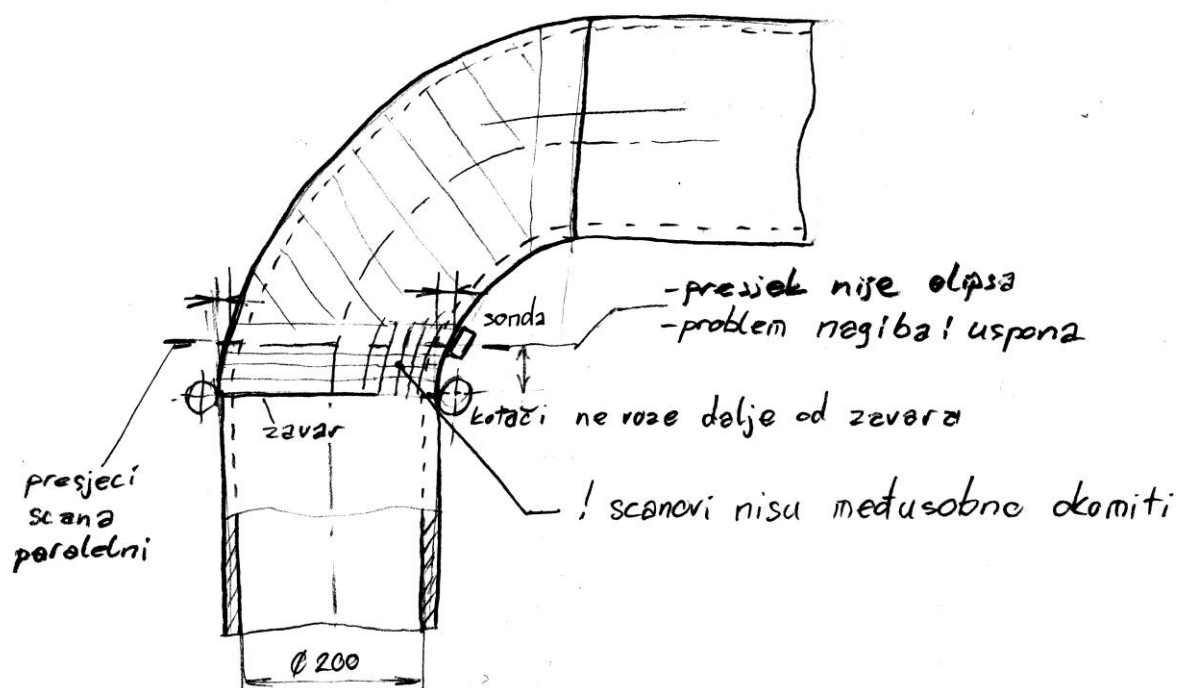
Iz početnog razmatranja odabran je daljnji razvoj koncepata u smjeru baziranom na krutom okviru i konceptu AA1 radi prednosti najlakšeg prijelaza preko koljena cijevi, jednostavne montaže i optimalnog pozicioniranja sonde.

## 5. TOČNOST POZICIONIRANJA

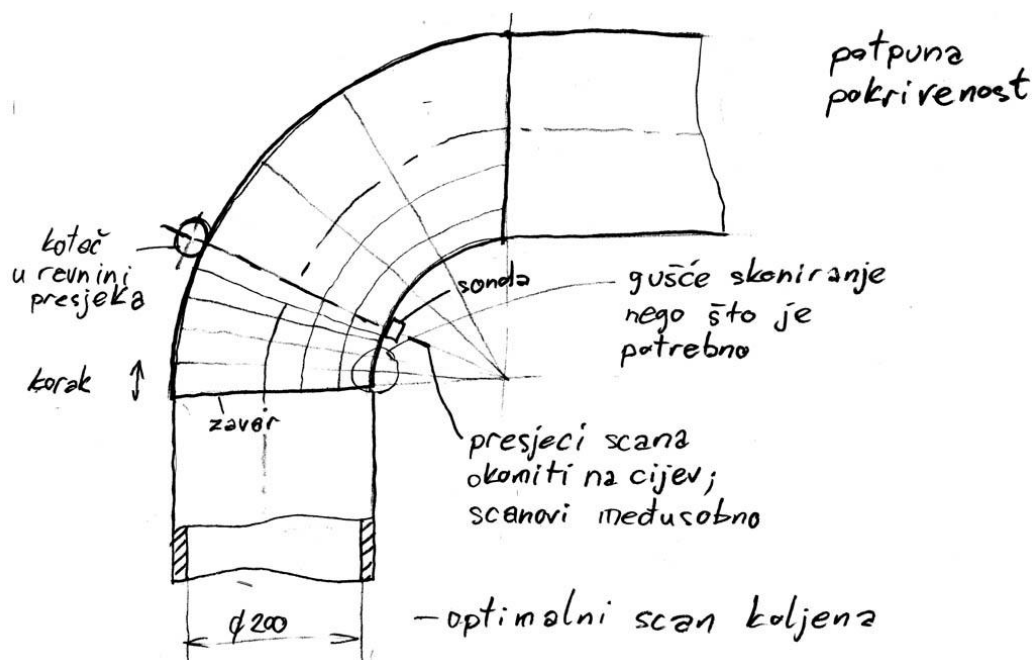
### 5.1. Zahtjevi skeniranja

Radi usmjerenosti pukotina u materijalu i nemogućnosti sonde da otkrije pukotine paralelne sa smjerom skeniranja za kvalitetno ispitivanje potrebno je materijal skenirati u dva međusobno okomita smjera. Razmak linija skeniranja ovisi o više faktora, fizički ponajprije o širini sonde i debljini materijala no postoje i propisi koje je nužno poštivati. Za potrebe ovog diplomskog rada zahtjev točnosti je ograničen na 2,5 mm od strane Instituta za nuklearnu tehnologiju. Da bi ispitivanje bilo mjerodavno bitno je osigurati pokrivenost čitave površine dok mjestimično zgušnjavanje linija skeniranja ne predstavlja problem.

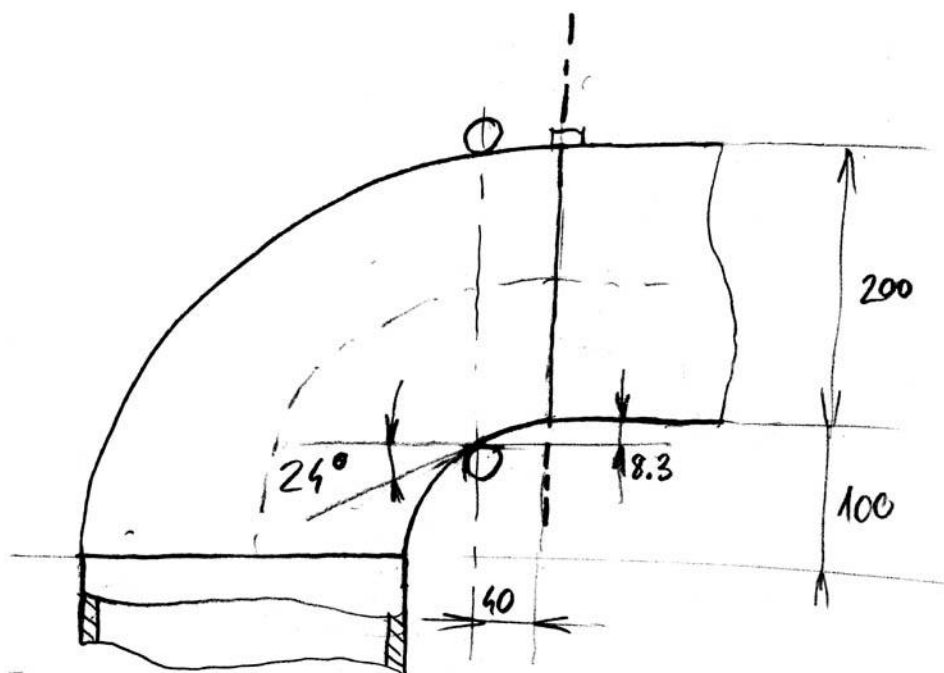
### 5.2. Geometrija skeniranja koljena ovisno o položaju kotača i sonde



Slika 28 Skeniranje sa ravnog dijela cijevi

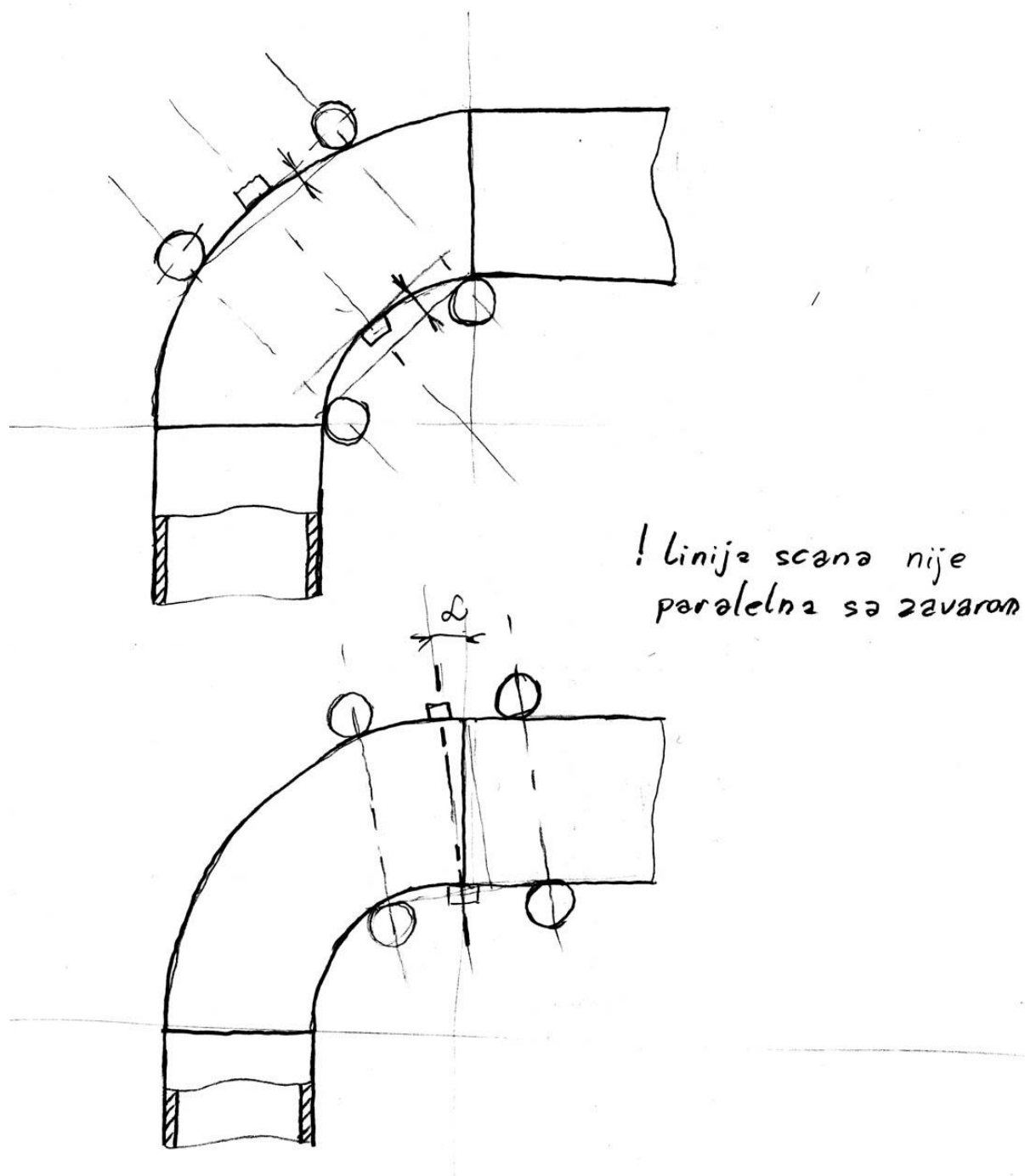


Slika 29 Skeniranje sondom u ravni kotača



- kut trenje kotača na skliskoj podlozi
- nepoznati koef. trenja

Slika 30 Skeniranje bočno postavljenom sondom



Slika 31 Skeniranje sondom centralno smještenom između kotača

### **5.3. Puzanje kotača**

Pri kotrljanju kotača opterećenog pogonskim momentom ili bočnom silom dolazi do pomicanja kotača u smjeru opterećenja bez proklizavanja uslijed sabijanja i razvlačenja elastičnog materijala kotača i podloge prije i nakon međusobnog kontakta. Utjecaj ove pojave na točnost gibanja manipulatora je potrebno ispitati i po potrebi korigirati.

Pri konstrukciji manipulatora s holonomnim ili mecanum kotačima koji su u paru u stanju dobavljati višesmjerno gibanje utjecaj puzanja kotača na točnost možemo umanjiti samo balansiranom konstrukcijom, no ona dokida problem samo za snimanje vodoravnih cijevi. Pri aksijalnom snimanju vertikalne cijevi je problem najizraženiji.

Problem se može višestruko umanjiti mehaničkim putem odustajanjem od višesmjernih pogonskih kotača jer tada možemo precizno koristiti mjerni kotač. Taj kotač ne prenosi moment nego samo nadoknađuje sile trenja u ležaju koje su promjenjivog smjera, za razliku od sila kojima su na vertikalnoj cijevi opterećeni pogonski kotači.

#### **5.4. Praćenje aksijalne i obodne pozicije sonde**

Iz istraživanja tržišta i iskustva inženjera s Instituta nuklearne tehnologije pokazalo se da je mjerni kotačić dovoljno točan za praćenje pozicije pri snimanju, međutim nije primjenjiv za koncepte AA radi njihovog dvosmjernog gibanja. Za praćenje položaja, kao i nadgledanje rada takvih manipulatora sa sigurne udaljenosti predložen je razvoj vizualnog sustava regulacije kretanja koji bi pratio aksijalni položaj i kut zakreta tokom snimanja i po potrebi korigirao kretanje. Istraživanje te tematike je pokazalo da postoje specijalne kamere visoke rezolucije konstruirane za rad u području ionizirajućeg zračenja. Također je pronađen razvijeni softver vizualnog praćenja koji zadovoljavajućom brzinom reagira na pomake praćenog predmeta. Time je izvedivost vizualnog sustava dokazana no razvoj takvog manipulatora, iako konstrukcijom bitno jednostavnijeg, zahtijeva razvoj vizualne regulacije gibanja.

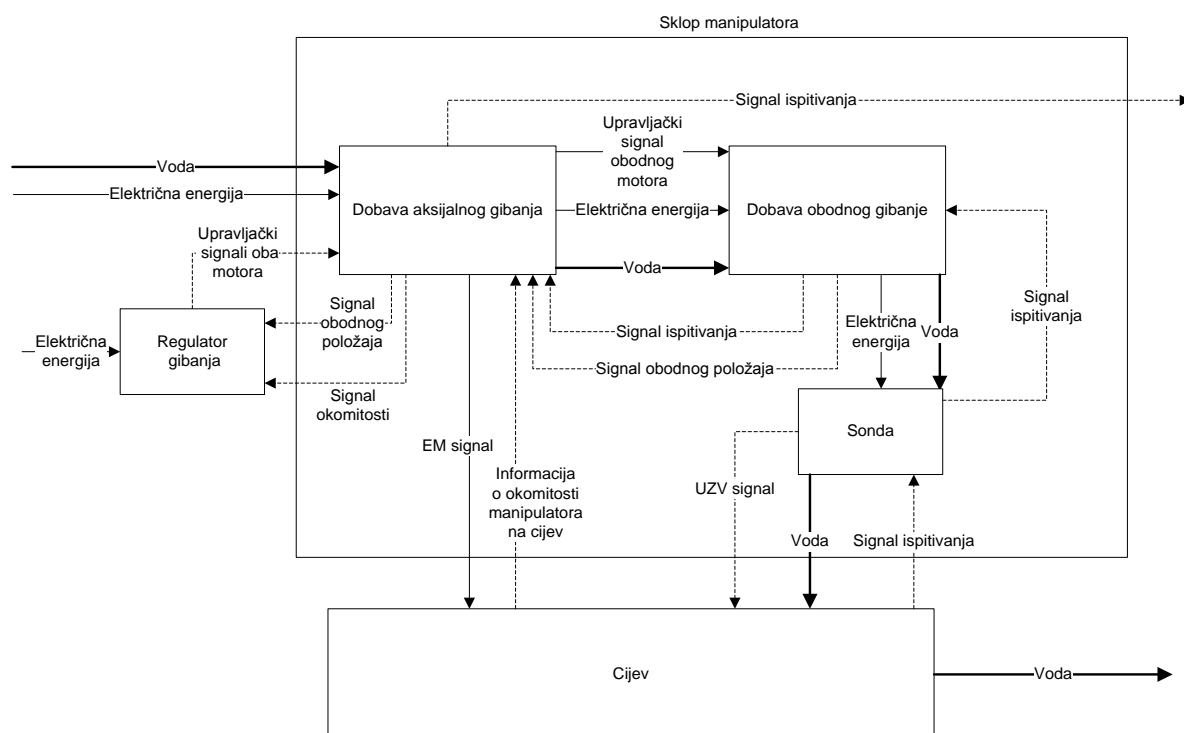
#### **5.5. Osiguravanje okomitosti okvira na presjek cijevi**

Ukoliko manipulator ima samo jedan red kotača tj. ako su svi smješteni na jednom presjeku cijevi, kao i pri prijelazu preko koljena gdje su putovi pogonskih kotača različiti potrebno je dodatno osigurati okomitost manipulatora na cijev radi točnosti i ponovljivosti snimanja. Istraživanje senzora za zadane uvjete rada je pokazalo da su najpogodniji indukcijski senzori radi visoke točnosti ( $\sim 4 \mu\text{m}$ ) i neosjetljivosti na vodene kapljice ili gel za ultrazvučno snimanje.

## 6. ALGORITAM KORIŠTENJA UREĐAJA

1. Sastavljanje uređaja i svih priključaka u sigurnoj zoni
2. Dolazak na lokaciju snimanja
3. Sklapanje uređaja na ravnom dijelu cijevi i priključivanje svih potrebnih vodova
4. Postavljanje nadzorne kamere; za neke koncepte upravljačke kamere
5. Provjera okomitosti uređaja, po potrebi podešavanje opruga i položaja
6. Pomak uređaja do koljena i kalibracija nultog položaja.
7. Ovisno o konceptu kalibracija kretanja kotača i određivanje krajnjih položaja manipulatora
8. Ukoliko se snimanje odvija u zoni radijacije odlazak operatera u sigurnu zonu odakle će nadzirati rad uređaja preko video nadzora
9. Obodno snimanje; nakon pomaka kontrola okomitosti i podešavanje uređaja. Pomaci kotača se pamte za aksijalno snimanje.
10. Aksijalno snimanje; postavljanje sonde na potrebni kut i predprogramirano kretanje do krajnjeg položaja
11. Po potrebi pomak kamere za ispitivanje idućeg segmenta cijevi i povratak u sigurnu zonu za daljnje snimanje
12. Rasklapanje uređaja

## 7. FUNKCIJSKA STRUKTURA



Slika 32 Funkcijska struktura



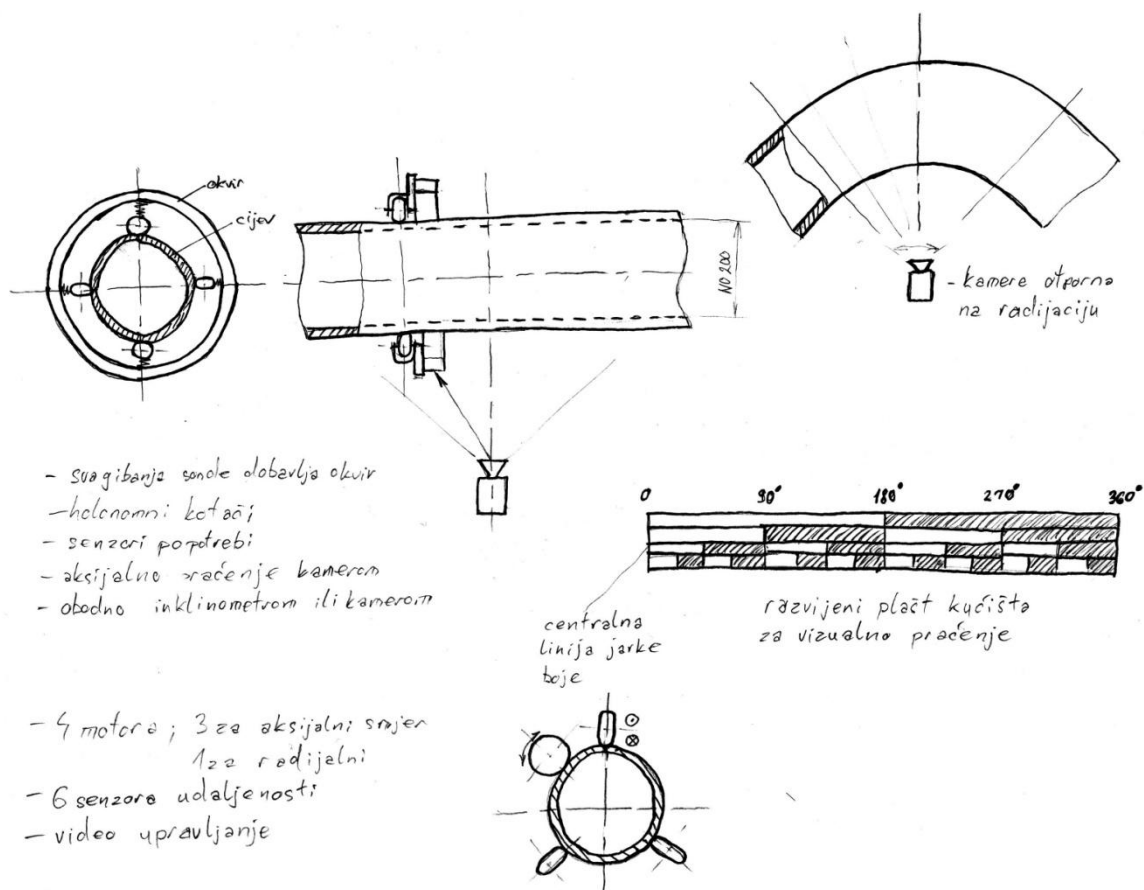
## 8. MORFOLOŠKA MATRICA

**Tablica 5. Morfološka matrica**

Nosivi okvir	Kruti rasklopivi prsten	Paralelni koaksijalni prstenovi s mogućnošću međusobne rotacije	Obodno spojeni prstenovi s mogućnošću rotacije i kutnog otklona
Omogućiti radijalni hod kotača	Klizač	Polužni mehanizam	
Dobava sile pritiska kotača	Tlačna opruga	Vlačna opruga	Pneumatski cilindar
Spoj mehanizma kotača i krutog okvira	Omogućiti kruti spoj svakih 5 mm s hodom 60 mm		
Motor	Servo	Step	Brushless DC
Prijenos	Pužni samokočni	Planetarni zupčanik	Reduktor
Prihvat sonde	Vijčani spoj nosača na okvir	Spoj sa kopčom	Leptir matica
Indikator aksijalnog položaja	Mjerni kotačić	Video nadzor	Zubna letva
Indikator radijalnog položaja	Inklinometar	Fiksni prijenosni omjer i inicijalni položaj	Video sustavom

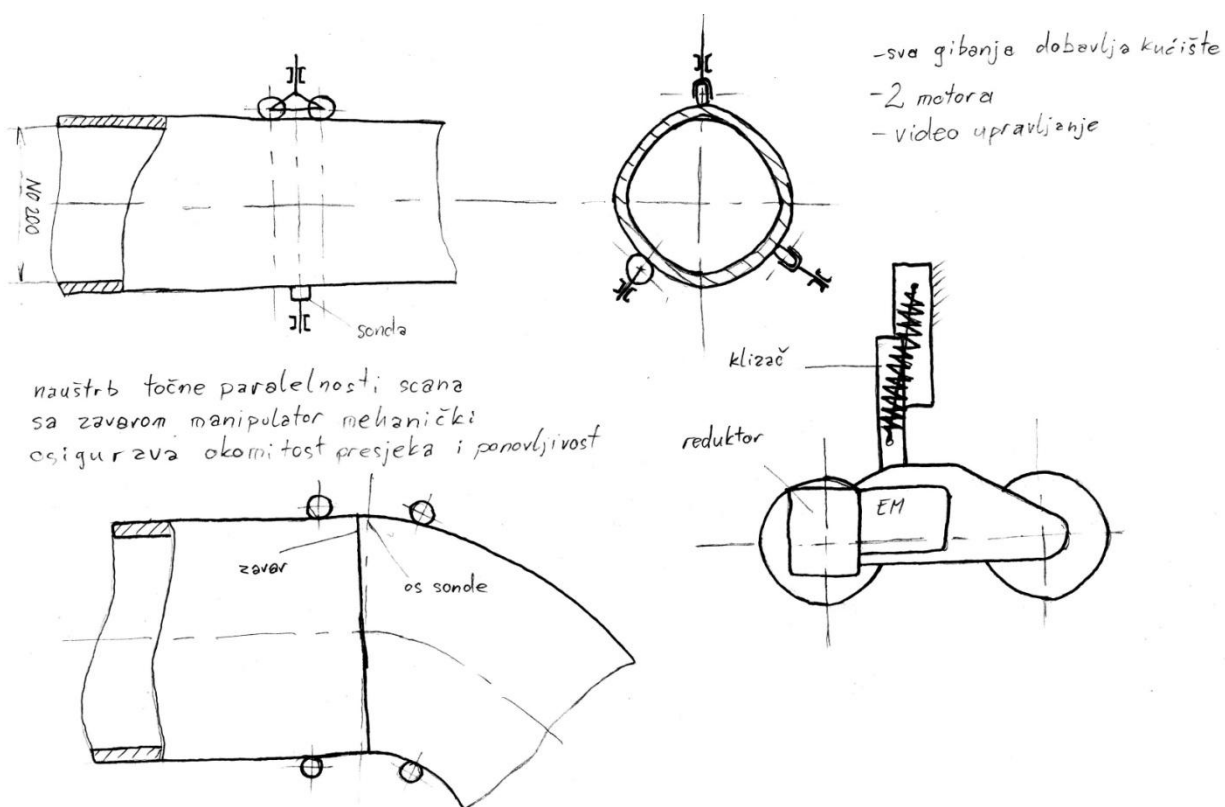
## 9. KONCEPTI

### 9.1. Koncept 1



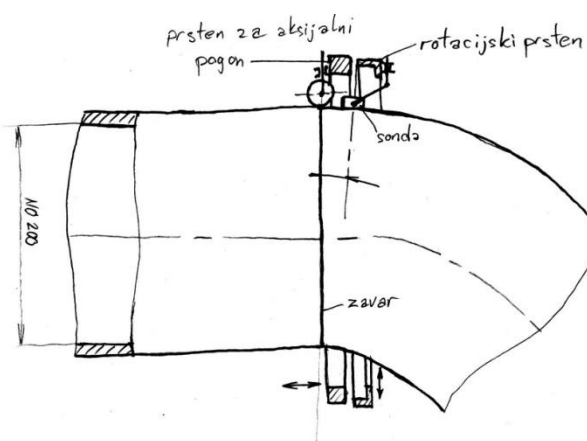
Slika 33 Koncept 1

## 9.2. Koncept 2



Slika 34 Koncept 2

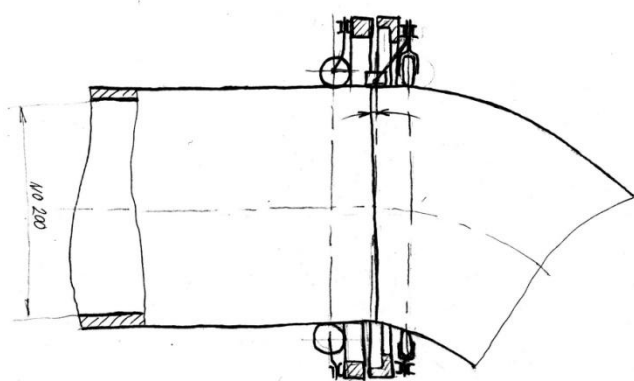
### 9.3. Koncept 3



- 4 motora: 3 za aksijalno kretanje  
1 za rotaciju prstena
- 6 senzora udaljenosti za okomitost prstena
- precizno mjerenje aksijalnog položaja mjernim kotačićem
- precizno mjerenje obodnog položaja sonde fiksnim prijenosnim omjerom pogona rotacijskog prstena
- odmak sonde od idealnog presjeka za snimanje ne predstavlja problem

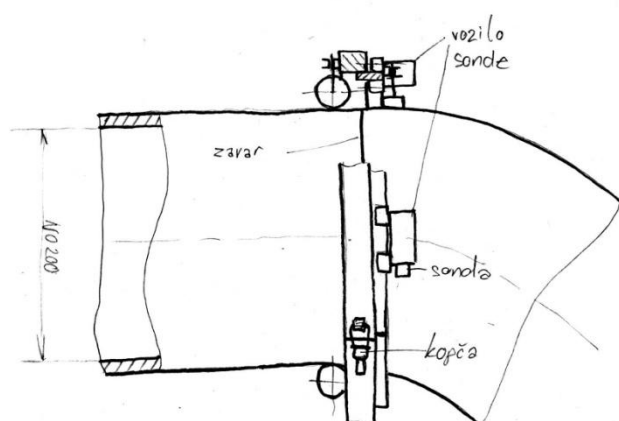
Slika 35 Koncept 3

### 9.4. Koncept 4



- nema potrebe za senzorima
- točno očitavanje aksijalne pozicije mjernim kotačićem
- točno očitavanje obodne pozicije pomoću veze između prstenova
- 2 motora (možda 3)
- 0 senzora
- balansirani prsten
- mala greška u paralelnosti snimanja sa zavarom nije problem

Slika 36 Koncept 4

**9.5. Koncept 5**

- 4 motora: 3 za aksijalno kretanje  
1 za rotaciju prstena
- 4-6 senzore
- precizno mjerenje položaja

**Slika 37 Koncept 5**

## 10. ODABIR KONCEPTA

### 10.1. Procjena relativne vrijednosti koncepata

Koncept	1  4 motora s kamerom i 4-6 senzora	2  2-3 motora s kamerom	3  paralelni prstenovi, 4 motora, 4-6 senzora	4  paralelni prstenovi, 2-3 motora	5  vozilo sonde; 4 motora, 4-6 senzora
Točnost pozicioniranja	4	3	4	3	4
Vrijeme sklapanja	5	5	2	2	5
Masa	5	4	3	2	4
Broj motora i senzora	2	5	2	5	2
Jednostavnost konstrukcije	5	4	1	1	3
Širina primjene	5	4	5	4	5
Radijalna visina	3	3	2	2	2
Aksijalna širina	5	3	4	3	3
Suma	34	31	23	22	28

## **10.2. Zaključak**

Ukoliko ideja korekcije kretanja preko video nadzora bude prihvaćena Koncept 1 je najbolje rješenje među predloženim konceptima. Ako bude odlučeno da se točnost ostvaruje isključivo mehanički za prototip predlaže se razvoj Koncepta 5 koji će, ukoliko se pokaže potreba, biti moguće preraditi u uravnoteženi uređaj, tj. Koncept 3. Koliko neuravnoteženost manipulatora uslijed vozila sonde utječe na točnost aksijalnog snimanja treba izmjeriti u stvarnosti, ali sudeći prema već postojećim rješenjima to ne bi trebao biti problem.

Unatoč najboljoj ocjeni Koncepta 1 za daljnji razvoj je odabran Koncept 5 jer za takav manipulator nije nužan razvoj vizualnog sustava regulacije. Praćenje položaja se vrši već iskušanim metodama za koje postoje gotova rješenja na tržištu.

## 11. RAZRADA

Problem dimenzioniranja ove konstrukcije se svodi na potrebnu silu pritiska kotača na podlogu koja ovisi o masi manipulatora i o kojoj ovisi masa manipulatora. Da se ovdje radi o razradi proizvoda koji bi se serijski proizvodio bio bi nužan detaljan iterativni postupak optimizacije mase, međutim ovdje se radi o prototipu za koji tek treba ispitati ponašanje pri radu i njegove sposobnosti kretanja preko koljena cijevi raznih geometrija.

### 11.1. Procjena mase manipulatora

Pošto je okvir složeno prostorno opterećen ne može se pronaći zadovoljavajući proračunski model pa je za dimenzioniranje potrebno služiti se FEM analizom. Kraća iterativna analiza je pokazala da je masa od 1.5 kg sigurno dovoljna za konstrukciju dovoljno čvrstog okvira. Inicijalna proračunska sila pritiska kotača je 150 N, a procijenjena masa cijelog manipulatora uz veliku sigurnost (1.5-2) je 4 kg.

### 11.2. Test magnetskog kotača

Magnetski kotači služe za dobavu obodnog gibanja sonde vozeći se po feritnoj traci od nehrđajućeg čelika. Da bi saznali koliko malih dimenzija magnetski kotači mogu biti kupljeno je nekoliko neodimijskih magnetskih prstenova u najmanjim raspoloživim dimenzijama u Zagrebu. Magnete je moguće izraditi po zahtjevu u toleranciji  $\pm 0.05\text{mm}$ . Procijenjena masa nosača sonde je 200 g no zbog sigurnosti je odlučeno da kotačić mora podnijeti 500 g mase da bi sigurno zadovoljavao uvjete.

Magnetski kotač se sastoji od neodimijske prstenaste jezgre i dva čelična prstena većeg promjera koji u kontaktu s magnetskom podlogom zatvaraju magnetski krug i ostvaruju znatno jaču silu privlačenja nego što bi magnet bez čeličnih prstenova ostvario. Osim tog razloga čelični prstenovi su poželjni jer štite krti neodimijski magnet od trošenja.

Ispitani magnetski kotač je improviziran pomoću neodimijskog prstena promjera 10 mm, debljine 2,5 mm, rupe od 3 mm i dvije podložne pločice. Točna nosivost nije bila cilj ispitivanja i ovisi o više faktora koje nije bilo bitno obraditi za dokazivanje funkcionalnosti koncepta.





**Slika 38** Test magnetskog kotača

### 11.3. Proračun potrebne sile pritiska kotača

#### 11.3.1. Okomita cijev

Na okomitoj cijevi iznos potrebne sile trenja između kotača i podloge proizlazi iz sume sila u vertikalnom smjeru i uvjetovan je masom manipulatora i inercijskim silama uslijed ubrzanja. Pretpostavlja se najgori slučaj opterećenja, a to je ubrzanje manipulatora prema gore odnosno kočenje nakon aksijalnog skeniranja prema dolje.

Procijenjena masa manipulatora za ispitivanje cijevi NO200-NO300 je 2,5 kg, a procijenjena masa manipulatorom najvećeg okvira za cijevi NO900-NO1000 je 5,5 kg. Potrebna ukupna sila pritiska kotača na cijev da bi manipulator uslijed trenja zadržavao poziciju proizlazi iz sljedeće jednadžbe.

$$F_{\text{trenja, statički}} = G_{\text{manipulatora NO300}} = m_{\text{manipulatora NO300}} \cdot g = 2,5 \text{ kg} \cdot 9,806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 24,5 \text{ N} \quad (1)$$

Za proračun ubrzanja pretpostavljen je put zaleta od 2 mm, a kao krajna brzina je odabrana vrijednost iz liste zahtjeva od 100 mm/s.

$$F_{\text{ubrzanja}} = m_{\text{manipulatora NO300}} \cdot a = m_{\text{manipulatora NO300}} \cdot \frac{v^2}{s} = 2,5 \text{ kg} \cdot \frac{(0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 \cdot 0,002 \text{ m}} = 6,25 \text{ N} \quad (2)$$

Broj pogonskih kotača je 2 i uz pretpostavljeni koeficijent trenja  $\mu=0,2$  slijedi potrebna sila pritiska pogonskog kotača za ubrzanje na vertikalnoj cijevi.

$$F_{\text{pritikotvert NO300}} = S \frac{F_{\text{trenjastatički}} + F_{\text{ubrzanja}}}{\mu} = 1,3 \frac{24,5 \text{ N} + 6,25 \text{ N}}{0,2} = 99,9 \text{ N} \quad (3)$$

#### 11.3.2. Vodoravna cijev

Pri ispitivanju vodoravne cijevi za proračun se uzima najgori slučaj opterećenja oslonca, a to je kad je oslonac postavljen na najvišu točku cijevi. Zbog krutog okvira uzima se da su pomaci gornje i donje opruge jednaki. Iz sume vertikalnih sila proizlazi da je razlika sila gornjeg i donjeg oslonca jednaka težini manipulatora. Stoga proizlazi:

$$F_{\text{horiz max NO300}} = F_{\text{pritikotvert}} + \frac{G}{2} = 112,2 \text{ N} \quad (4)$$

Radi sigurne dobave gibanja bit će potrebno kontrolirati minimalnu silu pritiska na pogonski kotač u slučaju da je smješten na najnižoj točki cijevi.

$$F_{\text{horiz min NO300}} = F_{\text{prtkotvert}} - \frac{G}{2} = 87,7\text{N} \quad (5)$$

Analognim proračunom za najveći okvir proizlazi:

$$F_{\text{prtkotvert NO1000}} = 219,9\text{N} \quad (6)$$

$$F_{\text{horiz max NO1000}} = 246,9\text{N} \quad (7)$$

$$F_{\text{horiz max NO1000}} = 193,0\text{N} \quad (8)$$

Za sigurnu dobavu gibanja manipulatora na vodoravnoj cijevi svaki pogonski kotač mora moći savladati inercijske sile ubrzanja. Otpore kotrljanja kotača enkodera aksijalne pozicije zanemarujemo, kao i sile nasuprotnog pogonskog kotača.

$$F_{\text{ubrzanja}} \leq 2 \cdot F_{\text{horiz min NO300}} \cdot \mu \quad (9)$$
$$6,25\text{N} \leq 35,1\text{N}$$

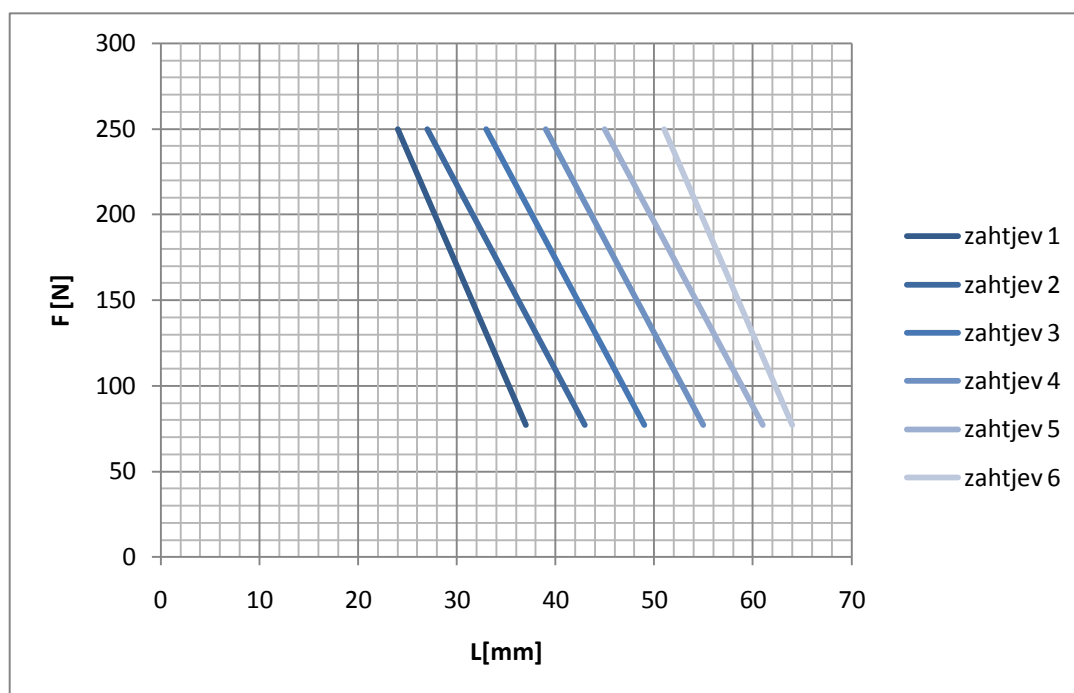
Iz prethodne jednadžbe očigledno je da proračunske sile zadovoljavaju uvjete, kao što zadovoljavaju uvjete i za najveći nosivi okvir manipulatora.

### 11.4. Odabir opruga

Iz liste zahtjeva proizlazi da pri ispitivanju cijevi određenog promjera kotači moraju savladavati neravnine visine  $\pm 5$  mm i to je zadani radni hod pri snimanju cijevi određenog promjera. Radi uštede vremena odabir opruga će se izvršiti samo za najmanji okvir.

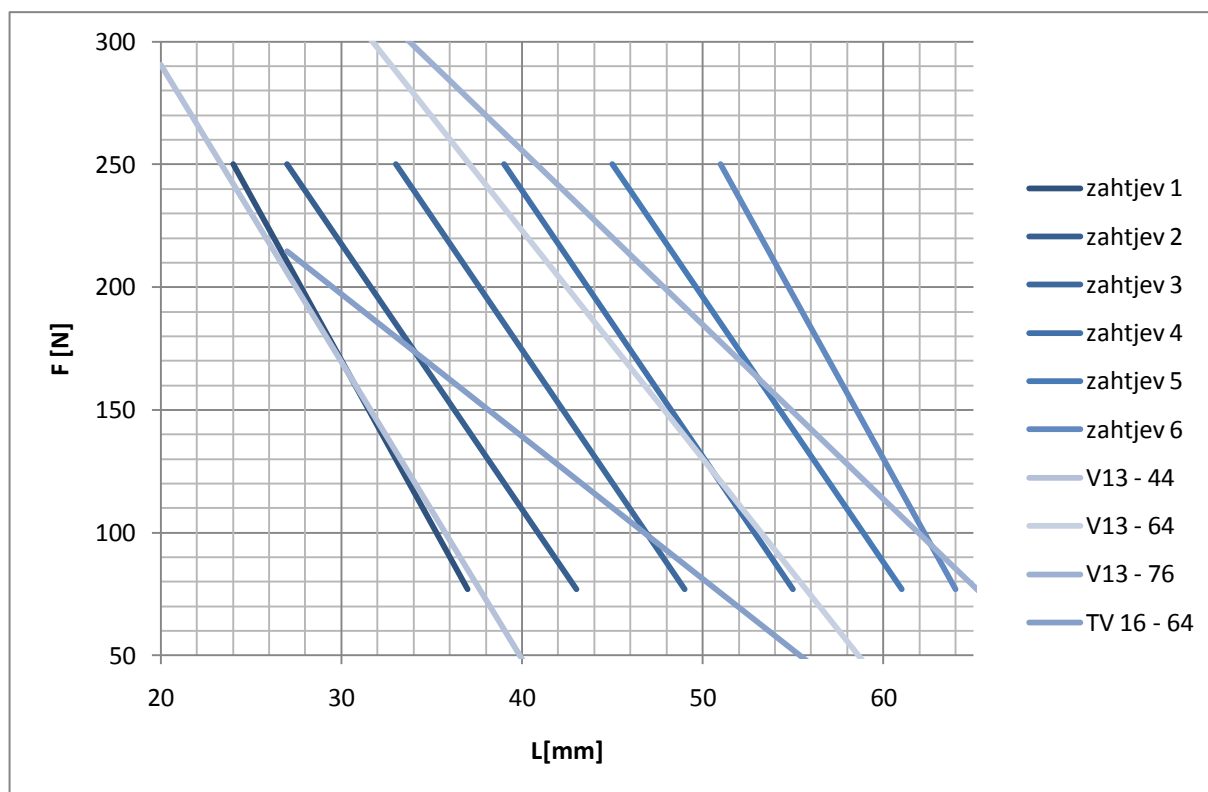
Zbog načina montaže sklopa kotača na okvir, koji je u koracima od 6mm, radni hod nekih opruga se povećava na 16 mm, dok se oprugama za krajnje položaje povećava na 13 mm. U tom području opruge pogonskih kotača moraju dobavljati silu ne manju od proračunske sile za vertikalnu cijev (3), ali proračunate bez dodatnog faktora sigurnosti, niti ne veću od maksimalne sile koju okvir može podnijeti, odnosno ne veću od sile pri kojoj nastupaju prevelike deformacije okvira. Za proračun sa sigurnošću možemo uzeti maksimalnu silu iz jednadžbe (9) jer ju okvir mora zadovoljiti na većim promjerima pa nema razloga pretpostaviti da to nije u stanju i na manjima. Raspon sila je prema tome od 77 N do 250 N.

Iz geometrijskih zahtjeva 3D modela manipulatora proizlazi sljedeći dijagram:



Slika 39 Zahtjevi geometrije na opruge sklopa kotača

Uspoređivanjem karakteristika raznih standarda opruga kao dobar odabir se pokazala serija opruga za lagana opterećenja proizvedenih po ISO standardu i nabavljiva u Europi.



**Slika 40 Karakteristike odabranih opruga**

Slika 40 prikazuje da se zadani raspon sila opruga može ostvariti pomoću 4 opruge za svih šest položaja. Opruga V 13 - 44 se koristi za najveće promjere cijevi, NO300, odnosno za najviši položaj montaže sklopa kotača na okvir. Opruga TV 16 - 64 se koristi za iduća dva položaja. Opruga v 13 -64 zadovoljava 4. zahtjev, a opruga V 16- 76 zadovoljava dva najniža položaja kotača na okviru, odnosno do cijevi NO200.

Odabrane opruge pokazuju da su potrebne karakteristike moguće za zadani raspon pomaka i sila što znači da je moguće izraditi opruge po mjeri koje bi pokrivale veći raspon, a broj opruga bilo moguće smanjiti na dvije ili tri. Okvir uređaja, uslijed vlastite mase, na vodoravnoj cijevi se na najmekšoj opruzi ovjesi 2 mm niže od idealnog položaja dok na na najkrućoj opruzi samo 1 mm.

## 11.5. Sklop okvira

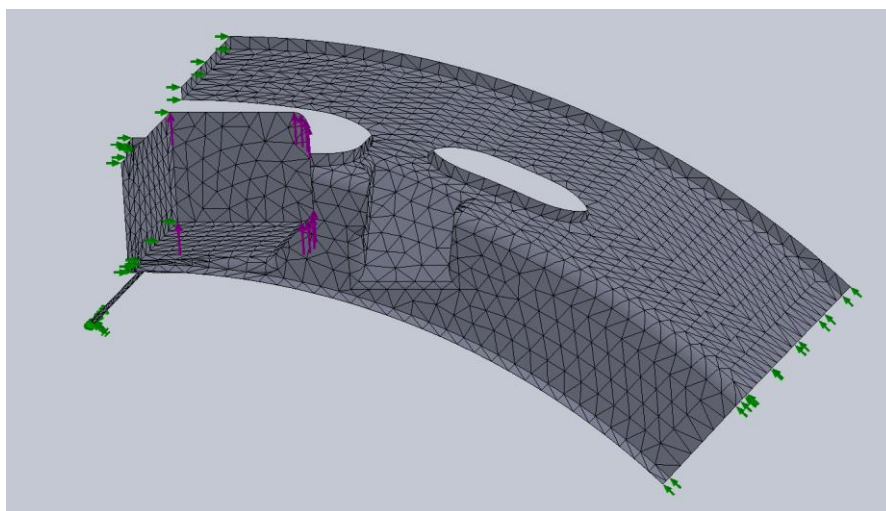
Zbog prostornog stanja opterećenja prikladno je ispitati krutost konstrukcije metodom konačnih elemenata. Za analize je odabran Cosmosworks iz Solidworks Office paketa.

Prikazat će se konvergencija rješenja simulacije najmanjeg aluminijskog okvira opterećenog silom od 160 N, koja se proračunski dešava pri snimanju cijevi NO300 pri najvećoj deformaciji najmanje odabrane opruge, odnosno pri prijelazu najveće neravnine iz liste zahtjeva, što je vidljivo na Slika 40.

### 11.5.1. Simulacija metodom konačnih elemenata

U svrhu demonstracije konvergencije rješenja promatrat ćemo rezultate simulacije najvećih naprezanja u čvorovima, naprezanja u elementima i progiba za sve kompleksnije mreže koristeći isključivo elemente 2. reda.

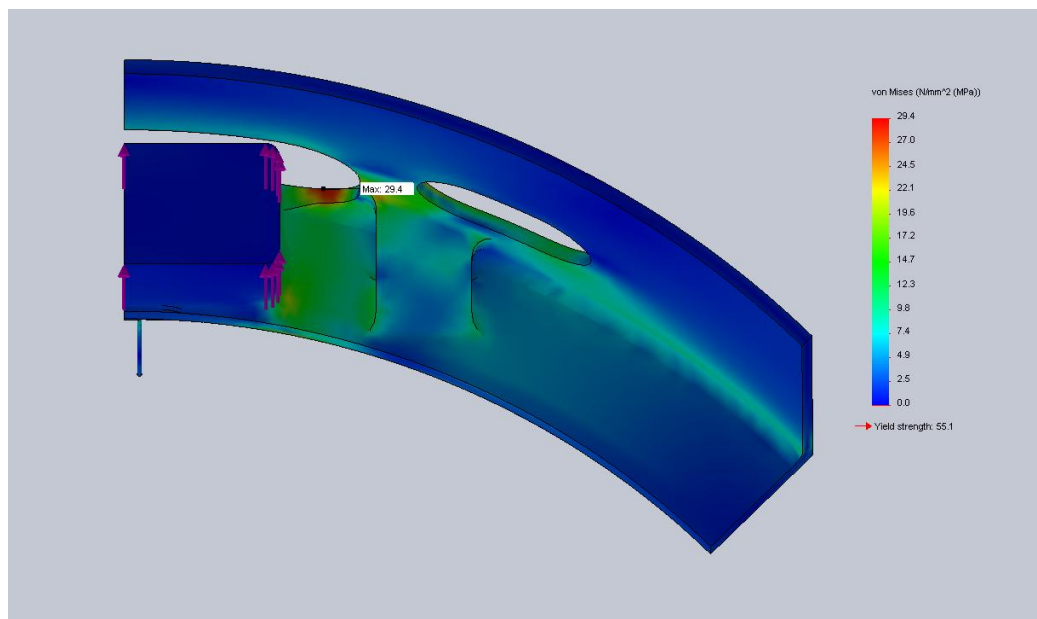
Radi simetričnosti konstrukcije dovoljno je ispitati odsječak osmine okvira presječenog po ravninama simetrije. Odabir rubnih uvjeta slijedi iz simetrije i opterećenja okvira. Kružna simetričnost je zadovoljena postavljanjem rubnih uvjeta klizača bez trenja, odnosno ograničavanjem pomaka čvorova na presjecima na njihove ravnine simetrije. Žičica koja je vidljiva na slikama služi samo za ograničavanje aksijalnog pomaka okvira bez utjecaja na rezultate, na njenom vrhu je rubni uvjet nepomične plohe jer bez toga pri analizi dolazi do 'klizanja' okvira u aksijalnom smjeru pa su rezultati ukupnog pomaka neupotrebljivi.



**Slika 41** Mreža prve simulacije i prikaz rubnih uvjeta

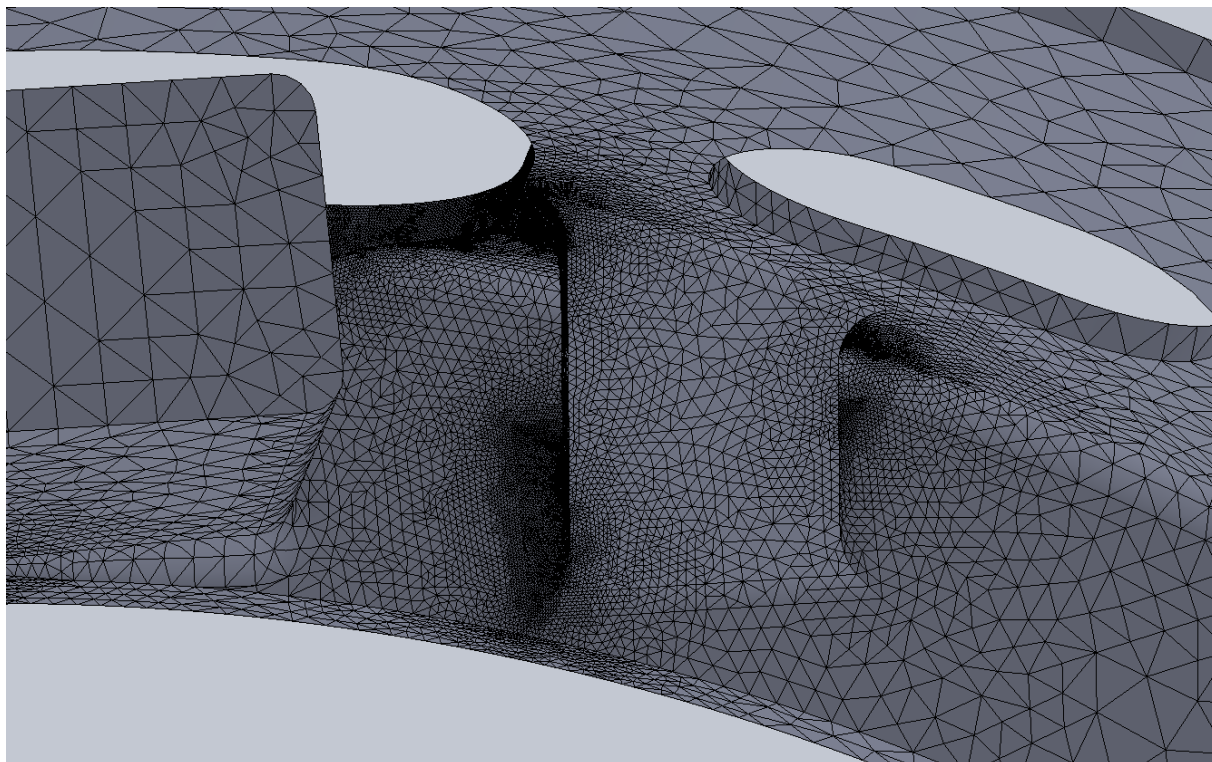


Nakon inicijalne analize postaje jasno koja su mjesta pojačano opterećena i gdje dolazi do potrebe za povećanjem broja elemenata.

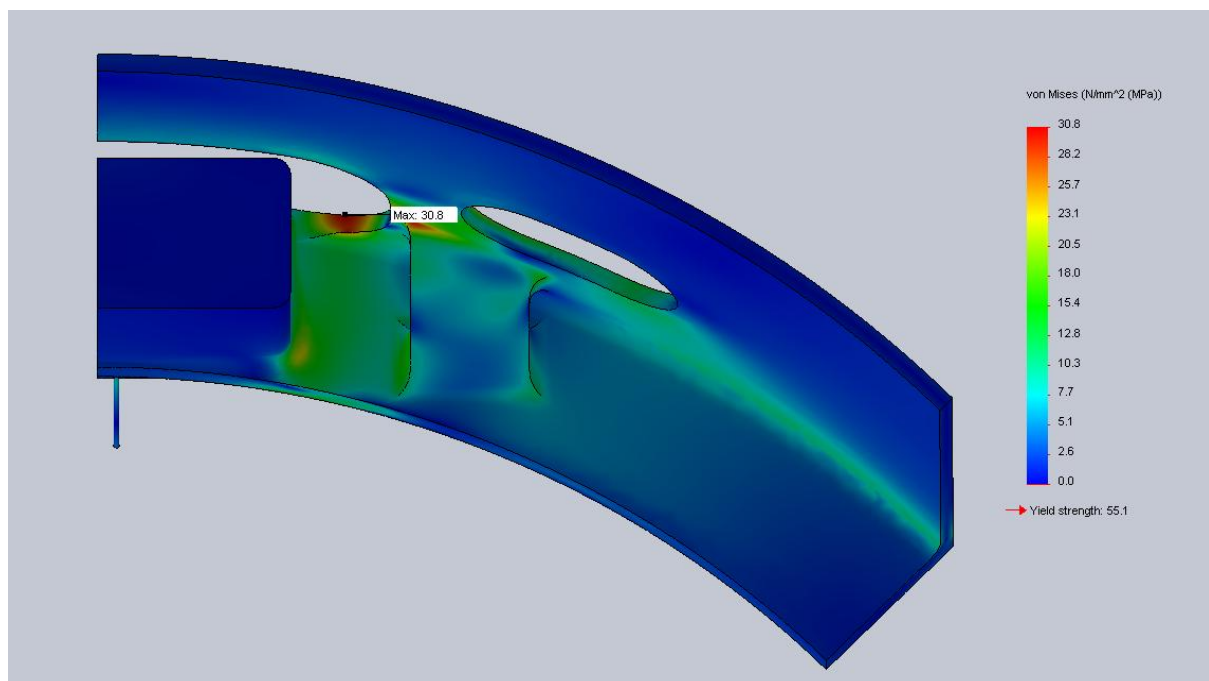
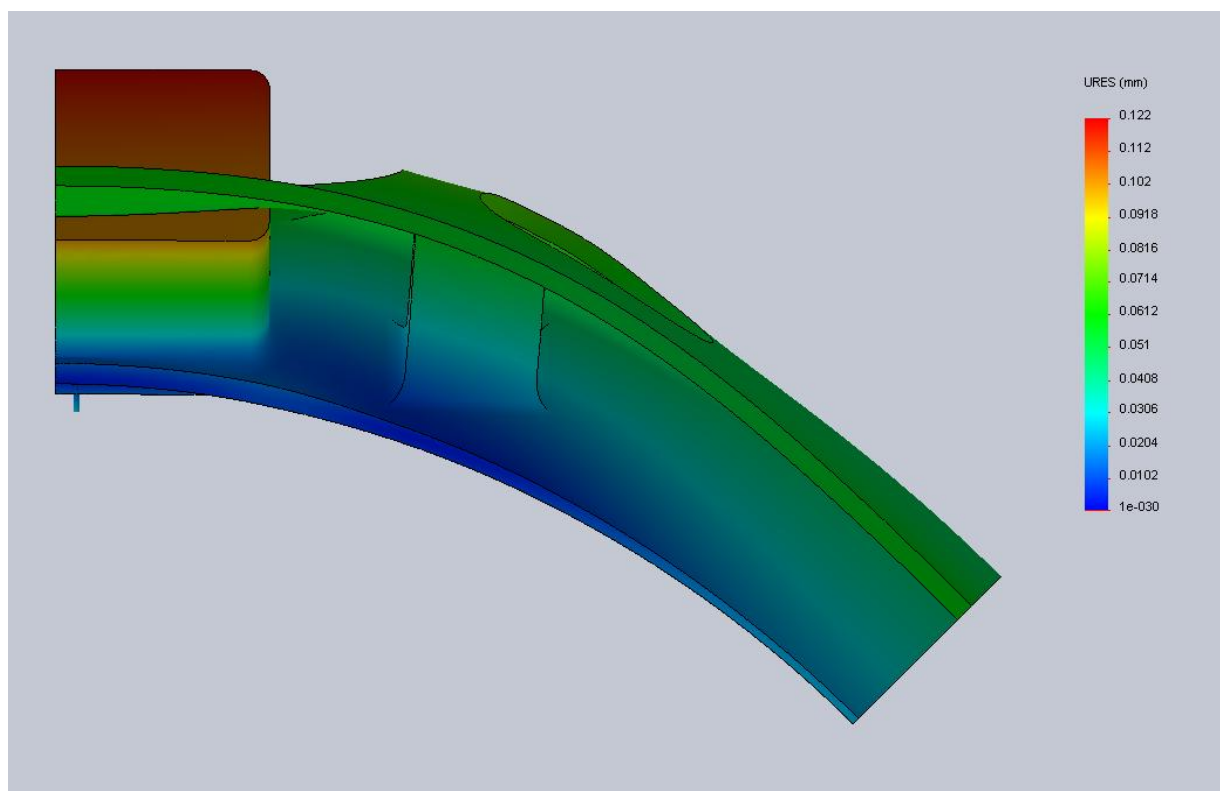


**Slika 42** Naprezanje u čvorovima početne mreže

Postupnim zgušnjavanjem mreže dolazimo do sve točnijih rezultata i sve kompleksijih i dugotrajnijih analiza. Slijedi prikaz krajnjih rezultata koji se mogu uzeti kao dovoljno točni za odabrani faktor sigurnosti u proračunu.



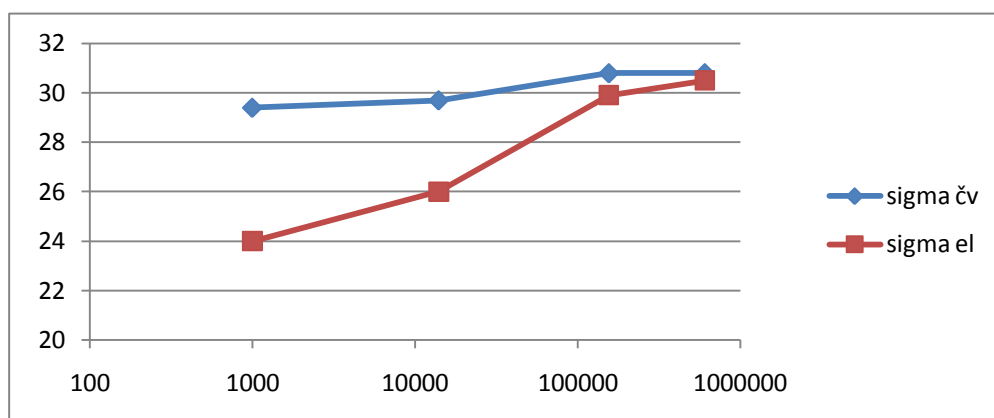
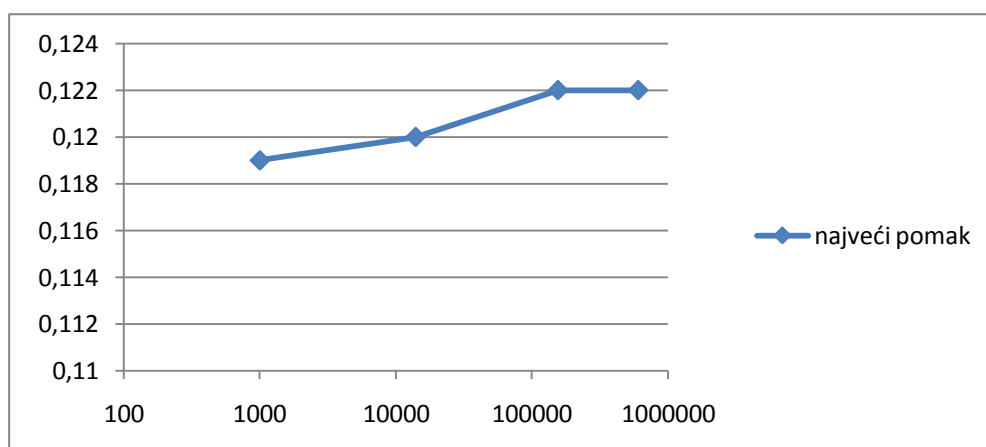
**Slika 43** Mreža konačne simulacije okvira NO300

**Slika 44** Najveće opterećenje okvira**Slika 45** Deformacije okvira uvećane 200 puta



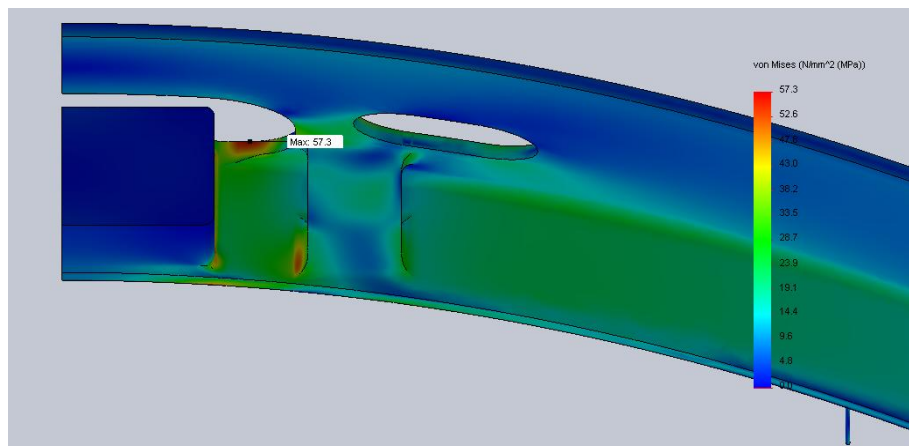
**Tablica 6. Konvergencija rezultata simulacije konačnim elementima**

Simulacija	N elemenata	$\sigma_{\max}$ čvora [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{\max}$ elementa [N/mm <sup>2</sup> ]	Najveći pomak [mm]
1	1000	29,4	24,0	0,119
2	14000	29,7	26,0	0,12
3	156000	30,8	29,9	0,122
4	607000	30,8	30,5	0,122

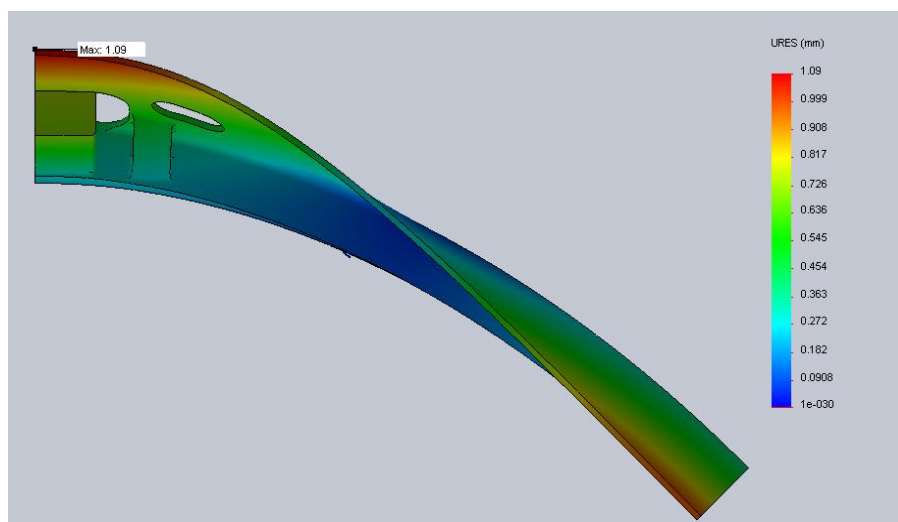
**Slika 46 Konvergencija naprezanja****Slika 47 Konvergencija pomaka**

Iz tablice i dijagrama je jasno vidljivo da rezultati konvergiraju jednom rješenju.

Koncepta radi, obavljena je i analiza okvira koji bi služio za cijevi NO1000. Bit će prikazani samo finalni rezultati naprezanja i pomaka pri opterećenju okvira silom od 400 N, što je sila dobivena proračunom uz dodanu sigurnost  $S=2$ .



**Slika 48** Naprezanja okvira za ispitivanje cijevi NO1000 pri opterećenju od 400N



**Slika 49** Pomaci okvira za ispitivanje cijevi NO1000 uvećani pedeset puta

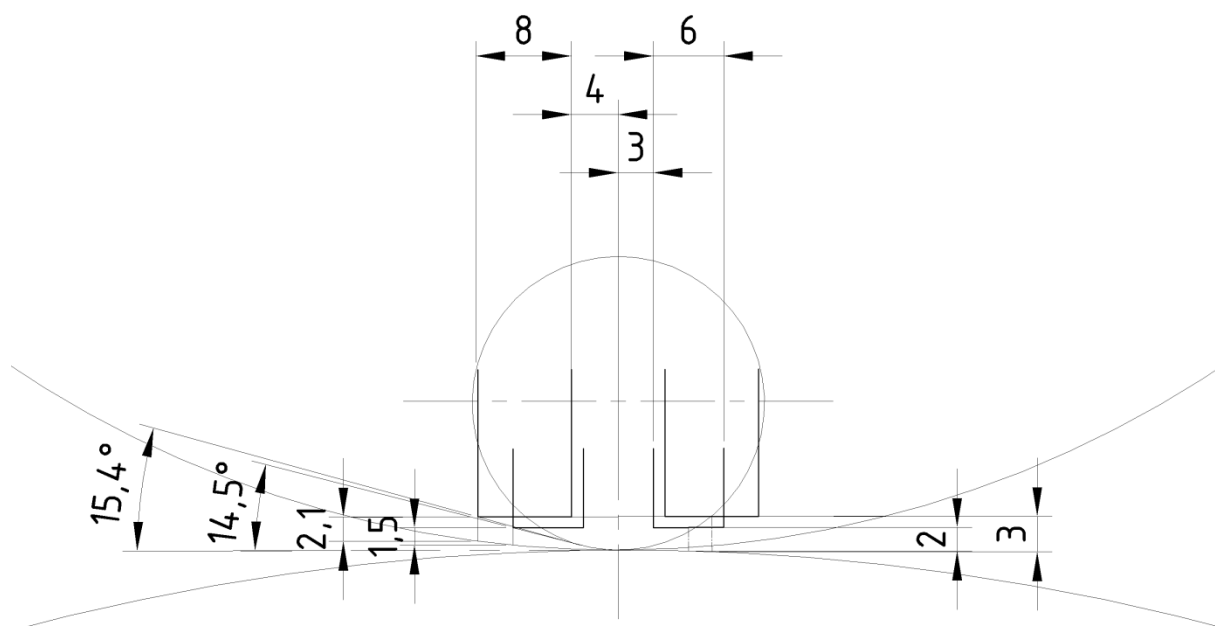
Za materijal simulacije se koristio aluminij 6061, no rezultati simulacije pokazuju da su naprezanja ispod granice tečenja najslabijih tehničkih aluminija. Također treba uzeti u obzir da je pri analizi izuzeta traka od feritnog čelika koja bi povećala krutost konstrukcije. Rezultat deformacije najvećeg okvira ukazuje na potrebu dodatne ukrute čime bi presjek trenutnog L profila postao U profil. Takva dodatna ukruta za najmanje radijuse nije geometrijski izvediva niti potrebna.

## 11.6. Odabir senzora

Pregledom načina rada, točnosti i izvedbe komercijalno dostupnih preciznih senzora udaljenosti izbor se suzio isključivo na minijaturne indukcijske senzore udaljenosti, ponajprije zbog njihove visoke točnosti i neosjetljivosti na vodu ili gel koji su uvijek prisutni pri ultrazvučnom ispitivanju cijevi.

### 11.6.1. Kontrola geometrijskih zahtjeva

Pregledom ponude ispostavilo se da su najmanji senzori sposobni točno mjeriti udaljenosti do 3 mm promjera 8 mm, a senzori za udaljenosti do 2 mm promjera 6 mm. Veći senzori nisu prikladni. Za odabir veličine senzora bila je potrebna geometrijska analiza za najlošije uvjete, odnosno kretanje kotača preko najmanjeg unutarnjeg i vanjskog radijusa koljena NO200. Iz naputka za montažu proizlazi da je za precizno mjerenje odnosno izbjegavanje međusobnog utjecaja senzora najmanja moguća udaljenost senzora jednaka njihovom promjeru.



**Slika 50** Odabir senzora

Iz geometrije je vidljivo da veći senzori, osim što su udaljeniji od podloge zbog čega imaju manju opasnost od zapinjanja, imaju i nešto veći kut pri kojemu ne zapinju o neravninu

podloge. Odabrani su senzori Pepperl Fuchs NMB3-8GM35-E0, M8 navoja s točnošću od 10  $\mu\text{m}$ .

### 11.6.2. Proračun točnosti senzora

Proračun uzima u obzir najgori uvjet a to je da jedan senzor radi gešku od +5  $\mu\text{m}$ , a drugi -5  $\mu\text{m}$ , a da s druge strane manipulatora nema senzora. Pošto su senzori razmaknuti 8 mm može se uzeti da je udaljenost točaka mjerenja 16 mm. Kut nagiba uređaja na cijev tada je:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2 \cdot 0.005\text{mm}}{16\text{mm}}\right) = 0.03581^\circ \quad (10)$$

$$\Delta y = d_{NO300} \cdot \sin(\alpha) = 324\text{mm} \cdot \sin(0.03581^\circ) = 0.2025\text{mm} \quad (11)$$

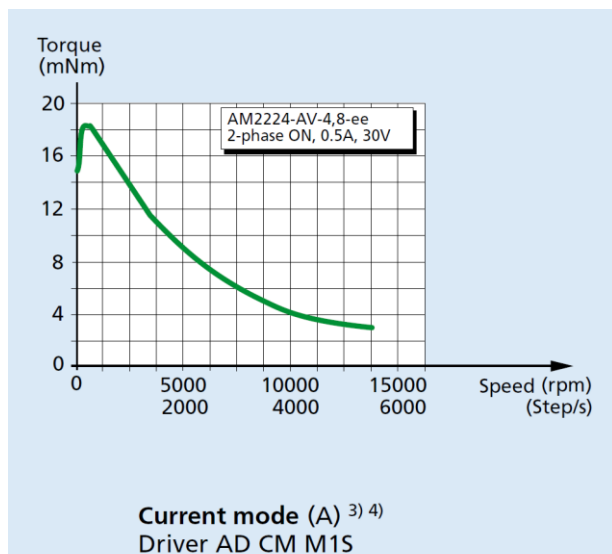
$$\Delta y_{\max} = 2 \cdot \Delta y = 0.404\text{mm} \quad (12)$$

Ukoliko senzori postoje i na drugoj strani uređaja, što ima smisla zbog korekcije neispravnog signala uslijed neravnina ili pozicioniranja u blizini zavora tada je vjerojatnost ovakve greške manja. Ako se zanemari nepreciznost aksijalnog mjerača udaljenosti, maksimalna greška uslijed pozicioniranja okvira je šest puta manja od dozvoljene greške od 2.5 mm.

## 11.7. Odabir motora i prijenosa

Budući da je uređaj zamišljen modularno, isti sklop kotača treba biti u stanju pogoniti i najveći okvir na vertikalnoj cijevi. Analogno već provedenom proračunu pritiska kotača, ovaj put bez dodane sigurnosti, za manipulator mase 5.5 kg s dva pogonska kotača dobivamo proračunsku silu pokretanja uređaja 33.85 N. Na odabranom radijusu kotača od 14 mm ta sila stvara moment od 0.474 Nm što je najveći proračunski moment. Moment vožnje jednolikom brzinom na vertikalnoj cijevi iznosi 0.378 Nm.

Odabir se vršio između Faulhaber step motora malih dimenzija i pripadajućih reduktora. Ispostavilo se da za pogon najvećih okvira pomoću dva kotača motori i reduktori dimenzija Ø15 ne zadovoljavaju zbog ograničenja potrebne ulazne brzine reduktora. Proračun koji slijedi je provjera snage motora AM2224 promjera Ø15 s 24 koraka po okretu. Za odabrani pripadajući reduktor naveden je najveći stupanj korisnosti  $\eta=0.7$  i preporučeno je ograničenje ulazne brzine na 4000 o/min.



**Slika 51 Karakteristika step motora AM2224**

Iz karakteristike motora vidljivo je da pri brzini od 4000 o/min dobavlja moment iznosa 10 mNm, a na svim manjim brzinama poprilično veći tako da u slučaju step motora nije potrebno provjeravati snagu pri zalijetanju već snagu pri krajnjoj brzini vožnje.

$$\omega_{kotaca} = \frac{100 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 \cdot r_{kotaca} \cdot \pi} = 1.137 \frac{\text{o}}{\text{s}} \quad (13)$$

$$i_{proračunski} = \frac{4000 \frac{\text{o}}{\text{s}}}{1.137 \cdot \frac{\text{o}}{\text{s}}} = 58.64 \quad (14)$$

$$i_{odabrani} = 66 \quad (15)$$

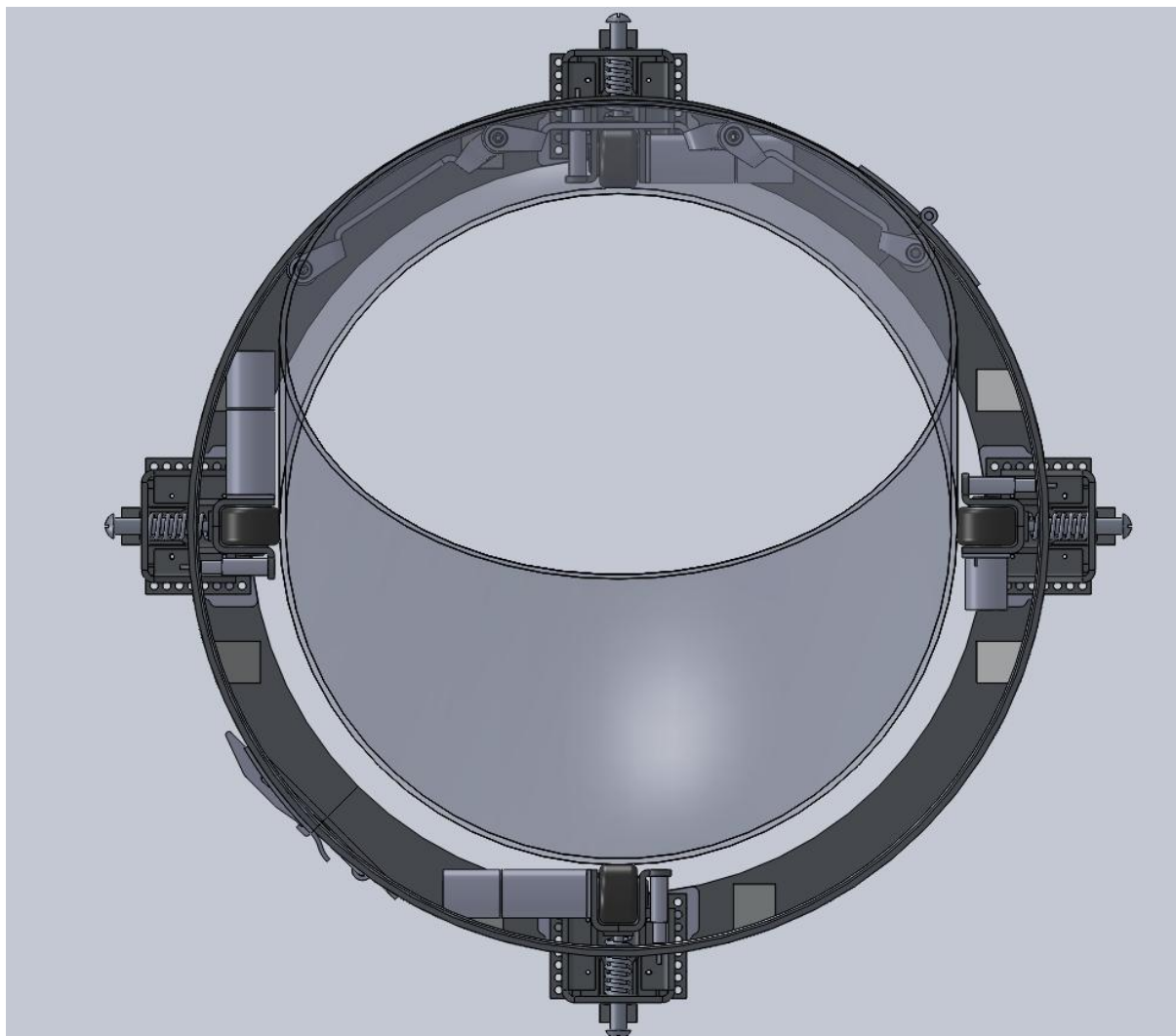
$$M_{kotača} = M_{motora} \cdot i_{reduktora} \cdot \eta_{reduktora} \cdot \eta_{ležaja}^2 = 0.01 \text{Nm} \cdot 66 \cdot 0.7 \cdot 0.98^2 = 0.444 \text{Nm} \quad (16)$$

$$S_{sklopapogona} = \frac{M_{kotača}}{M_{voznje}} = 1.175 \quad (17)$$

Sklop zadovoljava i za okvire za snimanje cijevi NO1000 u vertikalnom položaju. Razlika u proračunskom prijenosnom omjeru i prijenosnom omjeru odabranog reduktora dovodi do smanjenja brzine na 89 mm/s. Za brzinu od 100 mm/s potrebna je brzina vrtnje motora od 4500 o/min na kojoj bi moment motora bio nešto niži. Točna brzina koja bi bila granična za preskakanje step motora na najvećim cijevima u okomitom položaju treba biti ispitana u stvarnosti.

## 12. MODEL U 3D CAD/CAM SUSTAVU

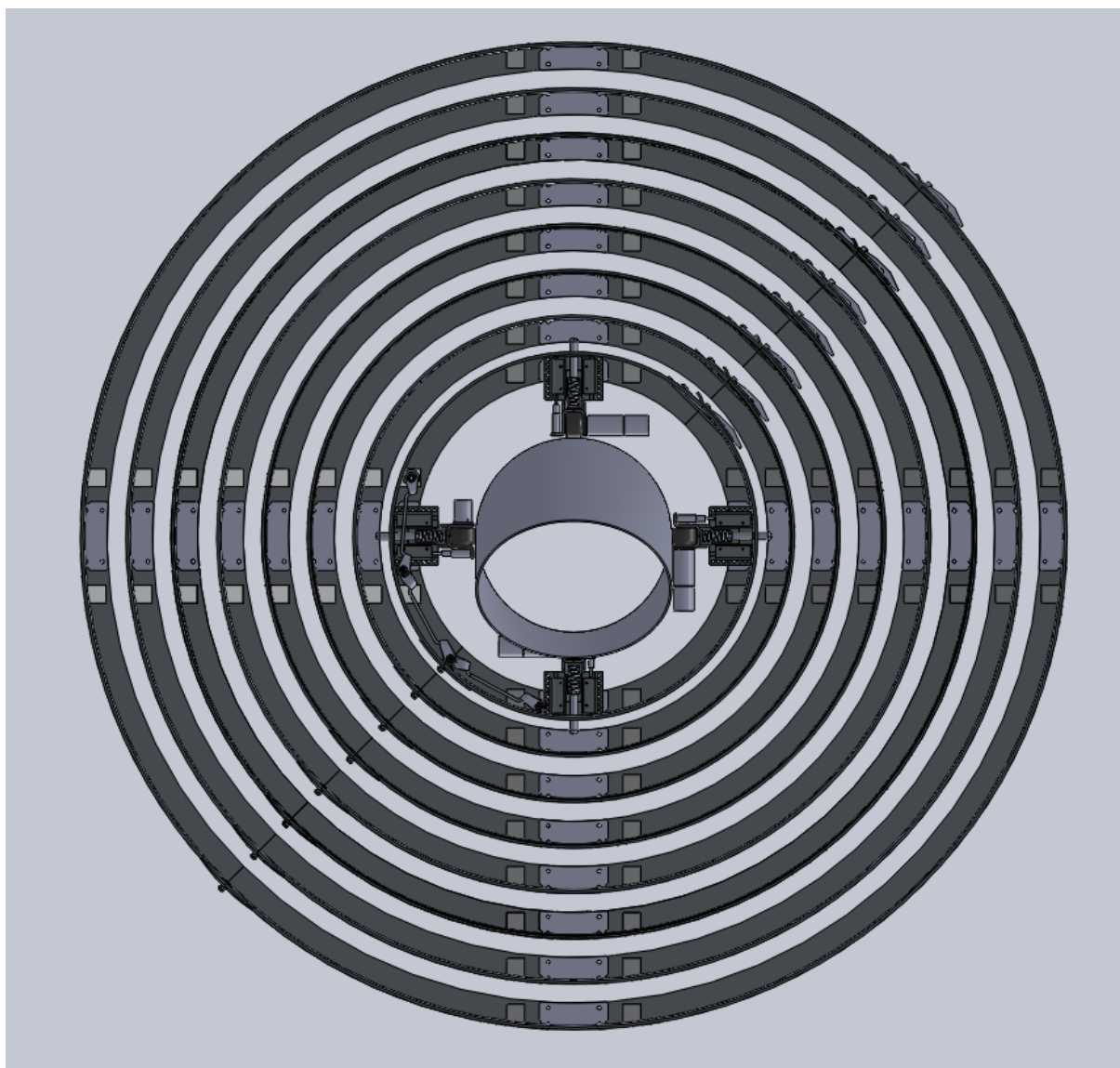
### 12.1. Prikaz modela



**Slika 52** Snimanje koljena NO300

## 12.2. Modularnost uređaja

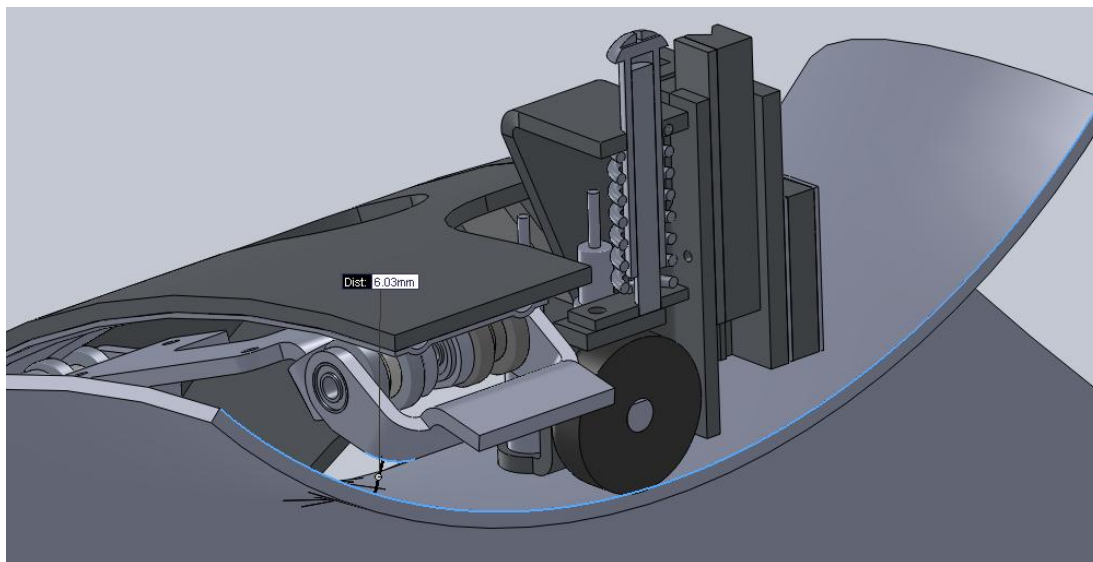
Uređaj je podijeljen u četiri glavna podsklopa: okvir, sklop kotača, sklop mjerača prijeđene udaljenosti i sklop vozila sonde. Ovisno o dimenzijama cijevi, u rasponu od NO200 do NO300 odabere se prikladan okvir i montiraju se kotači s prikladnom oprugom na prikladnu udaljenost. Nakon sklapanja dolazi se na mjesto snimanja te se uređaj montira na cijev u vrlo kratkom roku. Okviri su parametarski modelirani i izmjenom jedne kote mijenja se čitav sklop.



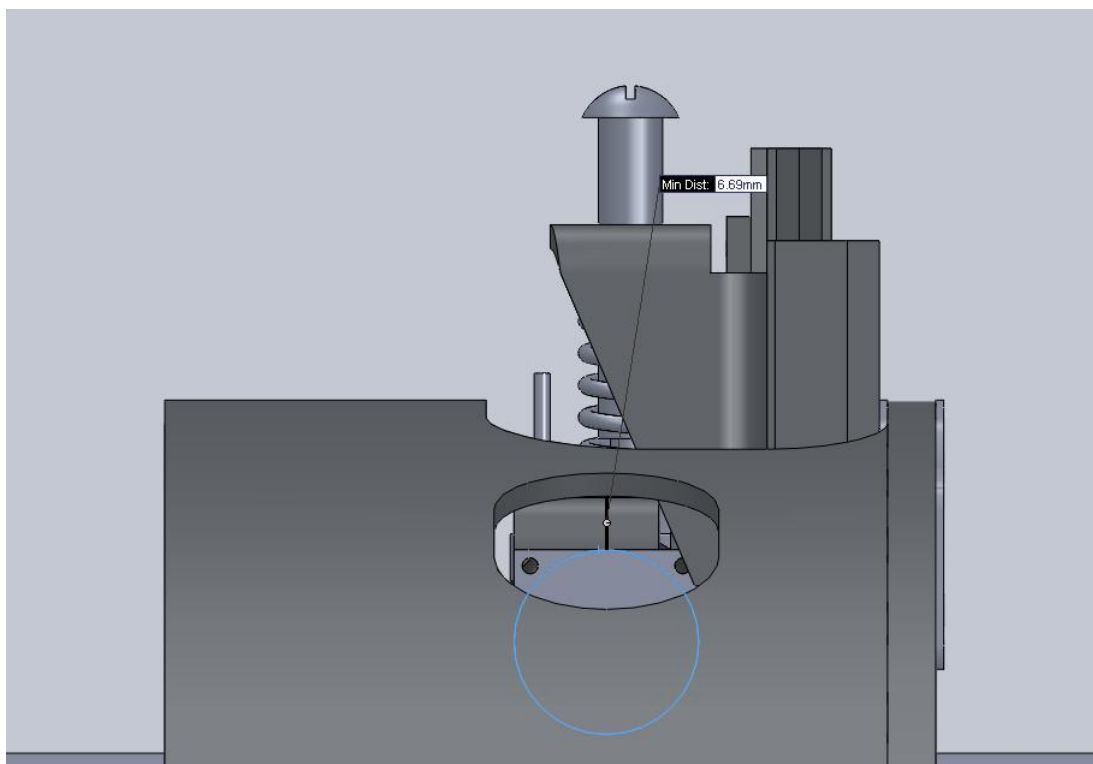
Slika 53 Okviri NO300 do NO1000

### 12.3. Geometrijska ograničenja

Kritična dimenzije za konstrukciju uređaja su bile one koljena NO300 po ANSI standardu zbog zahtjeva za što manjom visinom uređaja. Slijedi prikaz najmanjih udaljenosti manipulatora od cijevi pri prelasku koljena.

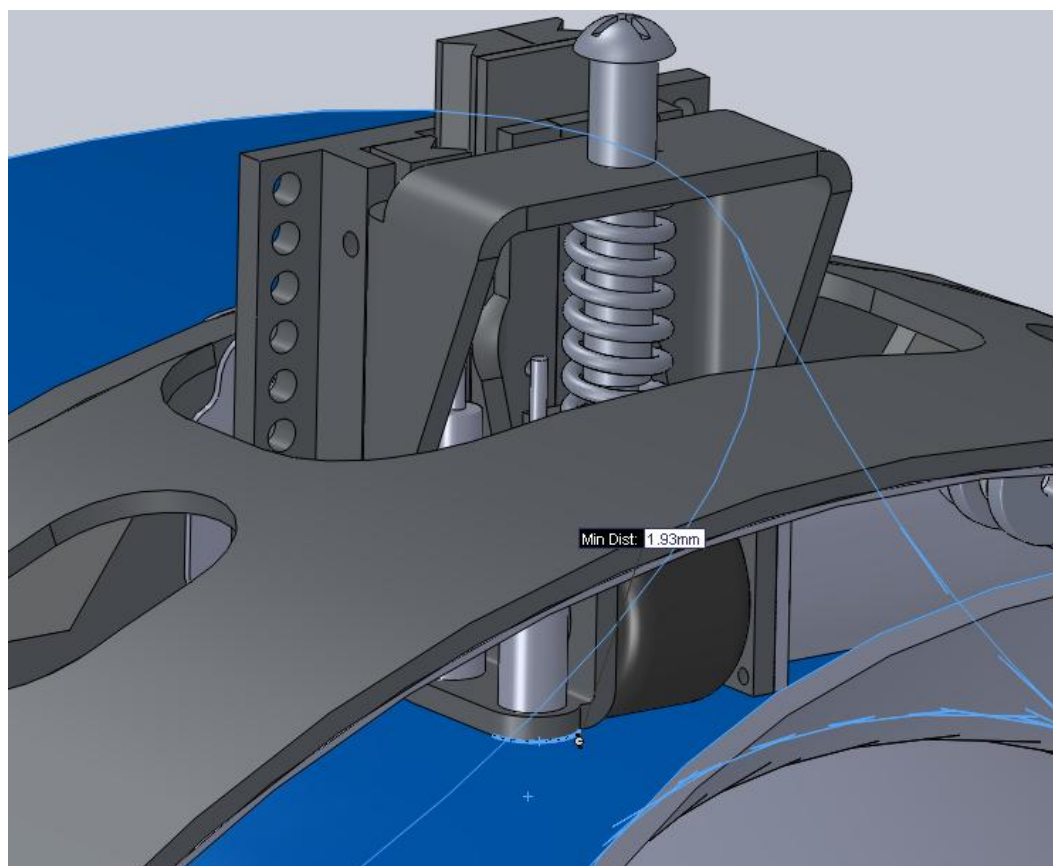


**Slika 54** Udaljenost vozila sonde na najmanjem radijusu koljena NO300

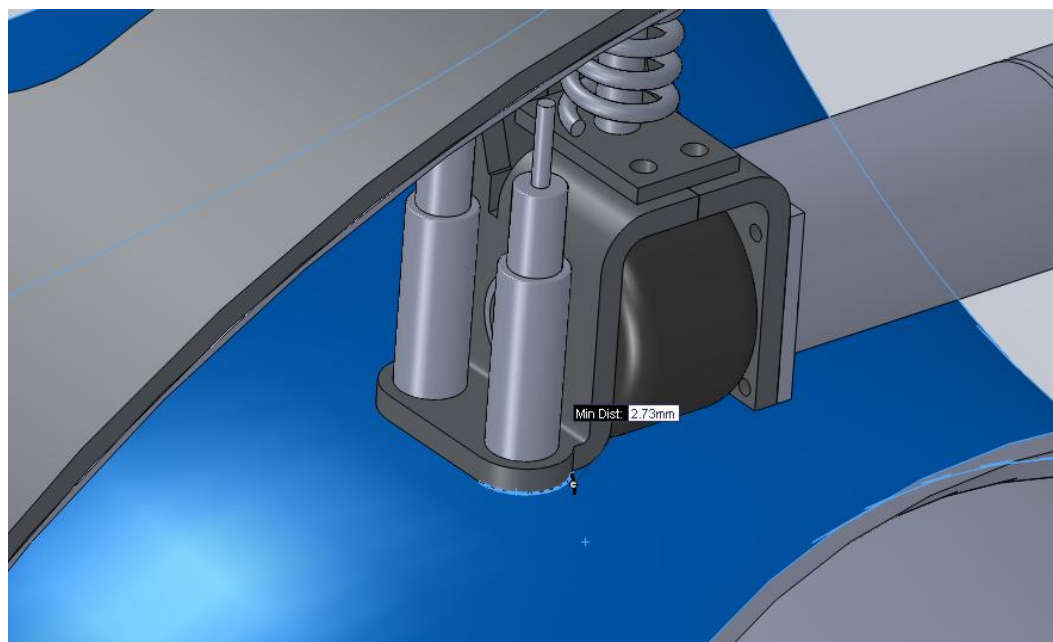


**Slika 55** Udaljenost motora od okvira uređaja pri snimanju cijevi NO300



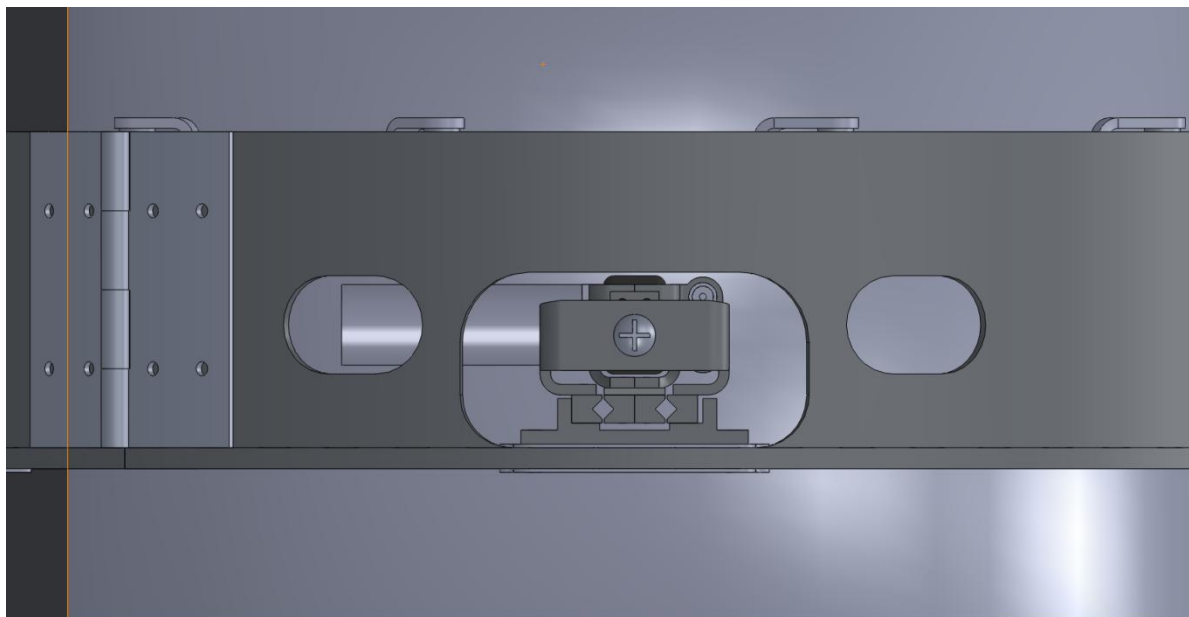


**Slika 56** Najmanja udaljenost senzora od podloge na cijevi NO300

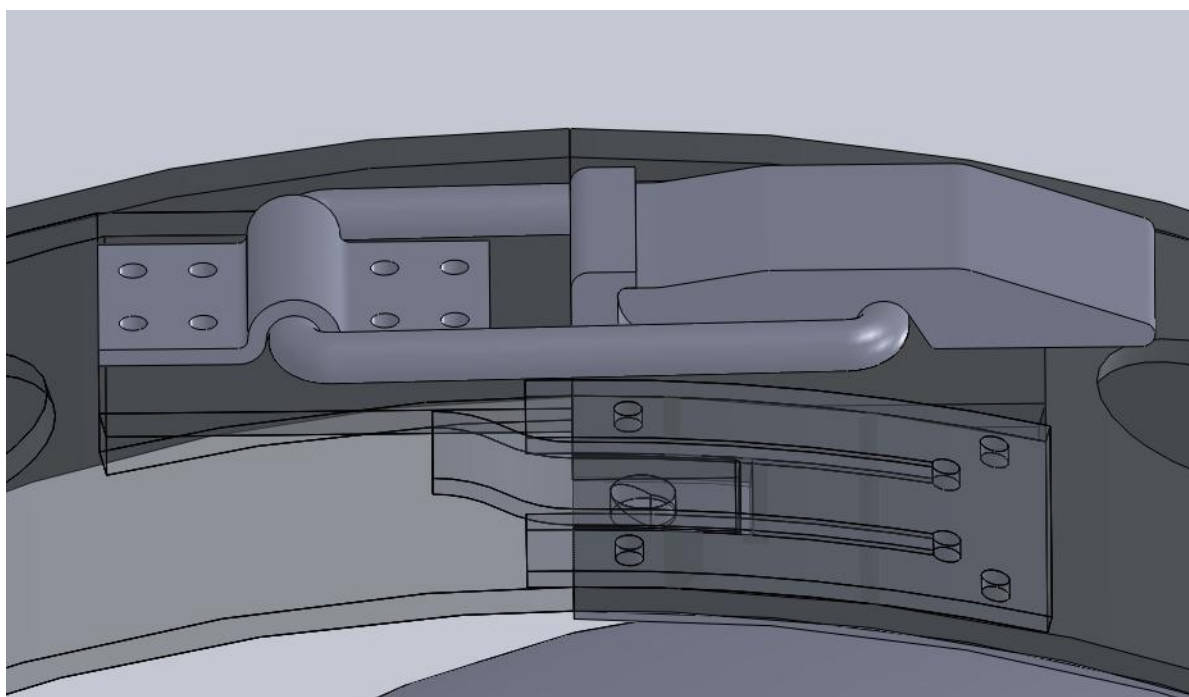


**Slika 57** Najmanja udaljenost senzora od podloge na cijevi NO200

## 12.4. Detalji

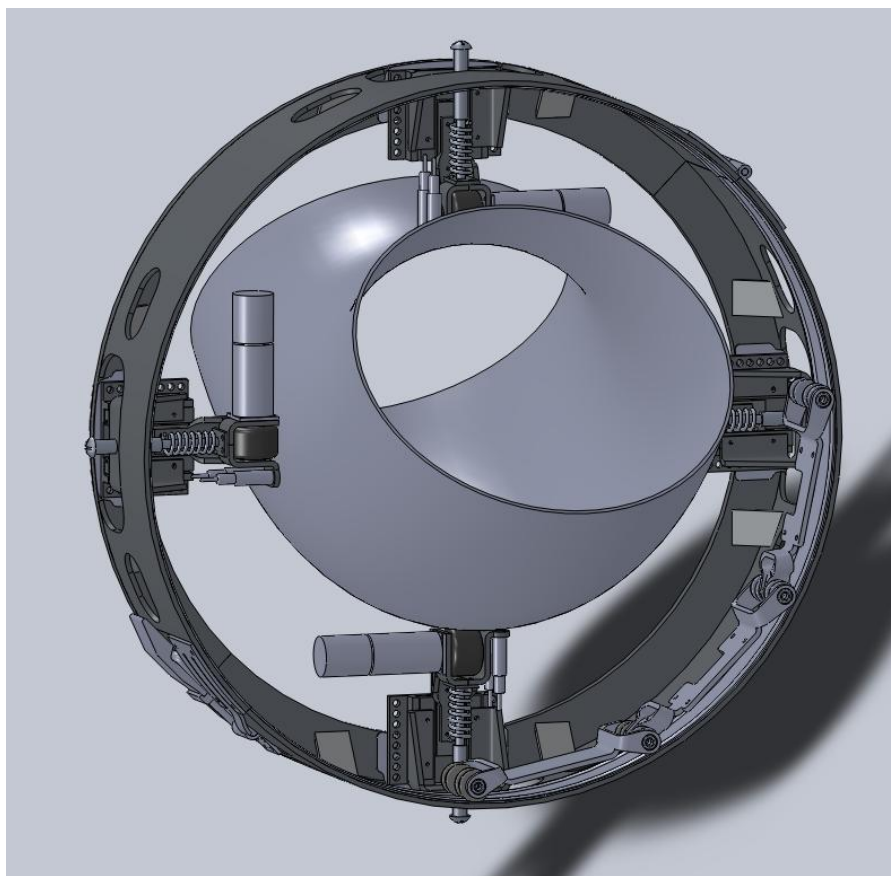


Slika 58 Tlocrt kotača

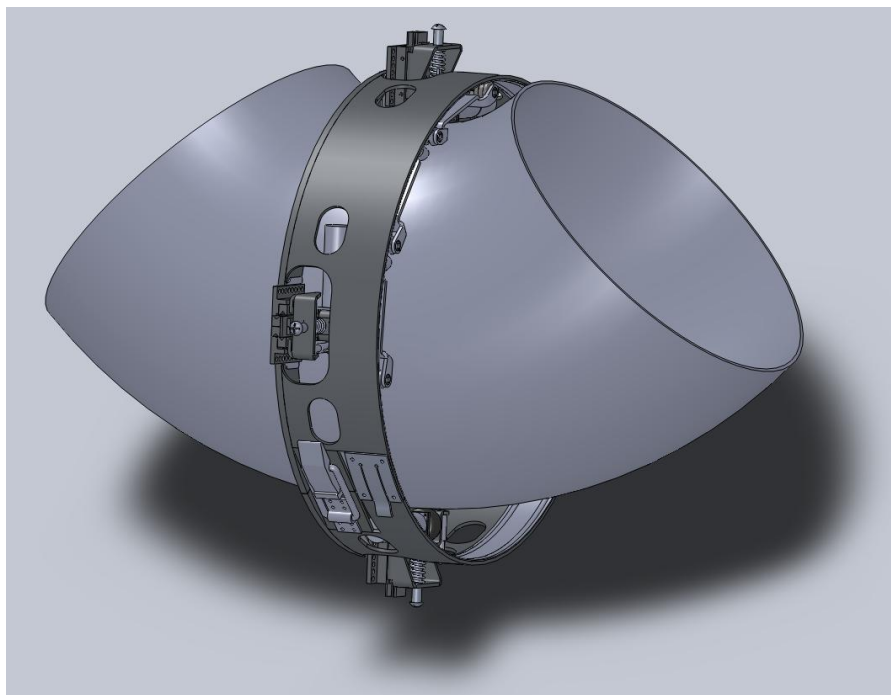


Slika 59 Kopča i spajanje magnetične trake

## 12.5. Prostorni prikaz



Slika 60 Ispitivanje koljena NO200



Slika 61 Ispitivanje koljena NO300

### **13. ZAKLJUČAK**

U ovom diplomskom radu razrađivan je problem ispitivanja koljena cijevi. S obzirom da na tržištu ne postoje prikladna rješenja pristupilo se razradi novog uređaja. Prikazana je konstrukcija nosivog okvira i aksijalnog pogona uređaja i dokazana izvedivost obodnog pogona sonde i pripadajućih nosača. Pokazano je da je sustavom krutih aluminijskih okvira i odabranim pogonom moguće ispitivati raspon cijevi od NO200 do NO1000, a da pritom uređaj bude lakši od 6 kg i brzo sklopiv na mjestu ispitivanja. Jedini zahtjev koji uvjetno nije ispunjen je radijalna visina uređaja. Naime, kod kopče je radijalna visina uređaja 105 mm što bi se moglo daljnjom razradom smanjiti, no to ne predstavlja problem jer cijevi koje se ispituju nisu obuhvaćene cijevima 100 mm većeg promjera.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

## LITERATURA

- [1] <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn078/idn078.htm>
- [2] <http://www.iteglobal.com/services/advanced-ndt/ultrasonic-phased-array/>
- [3] <http://www.qualitydigest.com/nov01/html/ultrasonic.html>
- [4] <http://www.namicon.com/products.xpg?catid=84&prodid=53>
- [5] <http://www.ob-ultrasound.net/somers.html>
- [6] <http://www.olympus-ims.com/fr/eddycurrenttesting/>
- [7] [http://www.advanced-ndt.co.uk/PortaScan\\_007.html](http://www.advanced-ndt.co.uk/PortaScan_007.html)
- [8] IPIM: Tehnički priručnik za procesnu industriju, Zagreb 1993.
- [9] <http://www.ais4ndt.com/>
- [10] [http://www.hrid-ndt.hr/proizvodnja\\_h.htm](http://www.hrid-ndt.hr/proizvodnja_h.htm)
- [11] <http://www.phoenixisl.co.uk/latest-news/magbug-proves-flexible-tool-for-bkw.html>
- [12] <http://www.artas.hr/magneti/neodimijski.htm>
- [13] Sorić J.: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing-Tehnička knjiga, 2004.
- [14] <http://www.skf.com/portal/skf/home>
- [15] <http://www.faulhaber.com/>
- [16] [http://www.pepperl-fuchs.com/global/en/gateway\\_js.htm](http://www.pepperl-fuchs.com/global/en/gateway_js.htm)
- [17] <http://www.berger-tools.co.uk>
- [18] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [19] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [20] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.